

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université A. MIRA – BEJAIA  
Faculté de Technologie  
Département de Génie électrique



Mémoire de Fin d'ETUDE Pour l'obtention du diplôme de

**MASTER EN électromécanique**  
Option **électromécanique**

**Thème**

**Modélisation et simulation d'un système turbine-  
générateur GTG  
Connecté au réseau et à la charge**

Présenté par :  
BALOUL IDIR

Encadré par :  
AOUZELLAG HAROUNE  
JURY : BOUDRIES Zoubi  
MADI EL YAZID

Année Universitaire 2023-2024



# Dédicace

À ma mère, pour son amour inconditionnel et son soutien sans faille. À ma sœur, pour sa présence réconfortante et son rire qui illumine mes jours. À mon père, qui veille sur moi depuis les cieux. À mes professeurs, pour leur enseignement et leur guidance tout au long de mon parcours académique. Votre passion pour votre métier et votre dévouement envers vos étudiants sont une source d'inspiration constante. À la famille universitaire, pour avoir créé un environnement propice à l'apprentissage et à l'épanouissement intellectuel. Votre travail contribue à façonner les leaders de demain. À mon encadrant, pour sa précieuse guidance et son soutien tout au long de ce travail. Votre expertise et votre patience ont été essentielles à la réalisation de ce mémoire. Je vous en serai éternellement reconnaissant. Aux employés de Sonatrach, à la raffinerie d'Alger, pour votre accueil chaleureux, votre expertise et votre aide inestimable pendant mon stage. Votre dévouement et votre passion pour votre travail m'ont grandement inspiré et ont contribué à la réussite de ce mémoire. Je vous dédie ce travail en reconnaissance de votre soutien et de votre générosité. Enfin, à tous ceux qui ont cru en moi et m'ont soutenu tout au long de ce parcours, merci. Votre présence et vos encouragements ont été un pilier essentiel dans l'accomplissement de ce projet. Cette réussite vous appartient aussi.

## Résumé

L'indépendance vis-à-vis du réseau électrique national est essentielle pour une grande raffinerie comme celle de Sidi Arcine, en raison des fluctuations du réseau, des coûts de l'électricité et des restrictions sur la consommation de puissance réactive. Cela justifie la nécessité de produire sur site sa propre énergie électrique. La production d'électricité est assurée par des turbo-alternateurs à gaz et à vapeur. L'optimisation et les performances des installations électriques sont de plus en plus exigeantes. Il est donc souvent nécessaire d'établir des modèles de calcul précis pour représenter fidèlement le comportement physique de ces installations. L'objectif principal de cette étude est de concevoir un modèle de simulation d'un turbo-alternateur à gaz à l'aide du logiciel MATLAB/Simulink de MathWorks. La première partie du projet a consisté à modéliser l'ensemble des éléments constituant un turbo-alternateur fonctionnant en îlotage. Ensuite La deuxième partie, une étude comparative des deux régulateurs a été réalisée pour obtenir une réponse dynamique optimale en termes de vitesse. Ainsi une concentration sur la modélisation des éléments constituant un turbo-alternateur connecté au réseau en mode isochrone. Enfin, les résultats obtenus ont été interprétés et comparés aux données réelles fournies par la raffinerie, permettant de valider l'exactitude et l'efficacité du modèle développé.

## abstract

Independence from the national power grid is essential for a large refinery like Sidi Arcine, due to grid fluctuations, electricity costs, and restrictions on reactive power consumption. This necessitates the on-site production of its own electrical energy. Electricity production is ensured by gas and steam turbo-generators. The optimization and performance of electrical installations are increasingly demanding. Therefore, it is often necessary to establish precise computational models to accurately represent the physical behavior of these installations. The main objective of this study is to design a simulation model of a gas turbo-generator using MATLAB/Simulink software by MathWorks. The first part of the project involved modeling all the components of a turbo-generator operating in island mode. Next, in the second part, a comparative study of two regulators was conducted to achieve an optimal dynamic response in terms of speed. Thus, focusing on the modeling of the components of a turbo-generator connected to the grid in isochronous mode. Finally, the results obtained were interpreted and compared with real data provided by the refinery, validating the accuracy and efficiency of the developed model

## ملخص

الاستقلال عن الشبكة الكهربائية الوطنية أمر ضروري لمصفاة كبيرة مثل مصفاة سيدي أرسين، وذلك بسبب تقلبات الشبكة وتكاليف الكهرباء والقيود المفروضة على استهلاك الطاقة التفاعلية. هذا يبرر الحاجة لإنتاج الطاقة الكهربائية في الموقع. يتم إنتاج الكهرباء بواسطة التوربينات الغازية والبخارية. تزداد متطلبات تحسين أداء المنشآت الكهربائية. لذلك، غالبًا ما يكون من الضروري إنشاء نماذج حسابية دقيقة لتمثيل السلوك الفيزيائي لهذه المنشآت بشكل موثوق. الهدف الرئيسي من هذه الدراسة هو تصميم نموذج محاكاة لتوربين غازي باستخدام برنامج MATLAB/Simulink من MathWorks. الجزء الأول من المشروع كان يركز على نمذجة جميع العناصر المكونة لتوربين يعمل في وضع الجزيرة. بعد ذلك، تم إجراء دراسة مقارنة بين اثنتين من المنظمات لتحقيق استجابة ديناميكية مثلى من حيث السرعة. تم التركيز أيضًا على نمذجة العناصر المكونة لتوربين متصل بالشبكة في وضع التشغيل المتزامن. أخيرًا، تم تفسير النتائج التي تم الحصول عليها ومقارنتها بالبيانات الحقيقية المقدمة من المصفاة، مما أتاح التحقق من دقة وكفاءة النموذج المطور.

**Mots clés:** Simulation, Régulateur, logique floue, Turbo-alternateur, synchronisation, isochrone , Machine synchrone à 3 étages.

**Key words:** Simulation, Regulator, Fuzzy Logic, Turbo-alternator, Synchronization, isochronous , 3 level synchronous machine.

**الكلمات المفتاحية:** المحاكاة الرقمية ، منظم، المنطق الضبابي، توربو مولد ، التزامن متساوي التوقيت ، آلة متزامنة

# Contents

<b>1 État de l'art</b>	<b>2</b>
1.1 Introduction	2
1.2 Présentation de l'entreprise	2
1.3 Description générale de la raffinerie d'Alger	2
1.3.1 Historique	3
1.3.2 Données techniques	3
1.3.3 Température de fonctionnement	3
1.3.4 Données du réseau électrique	3
1.4 Réseau électrique de la raffinerie	3
1.4.1 Doublement de l'alimentation	4
1.4.2 Production d'énergie de l'usine	4
1.4.3 Système de distribution	4
1.4.4 Protection contre le retour d'énergie	4
1.4.5 Transformateurs abaisseurs	4
1.4.6 Système de distribution HT (20 kV) (Appareillage de distribution principal en CPP)	5
1.4.7 Système de protection cathodique	5
1.5 Production d'électricité par turbine à gaz	5
1.5.1 Éléments principaux du Groupe turbine	5
1.5.2 Le fonctionnement de la turbine à gaz	6
1.5.3 Avantages des turbines à gaz	7
1.5.4 Inconvénients des turbines à gaz	7
1.5.5 Le Démarrage et zone de fonctionnement	7
1.5.6 Rendement et cycle combiné	7
1.5.7 Limites du cycle combiné	8
1.6 Machine synchrone avec excitation à 3 étages	8
1.6.1 Principe de fonctionnement	8
1.6.2 Structure de Machine Synchrone	8
1.6.3 Avantages des machines synchrones :	9
1.6.4 Applications des machines synchrones :	9
1.6.5 Amortisseur	9
1.7 Groupe d'excitation	9
1.7.1 Description du groupe d'excitation	10
1.7.2 Pilotage d'excitatrice triphasée	10
1.8 Système de commande électrique (ECS)	10
1.8.1 Point de synchronisation des disjoncteurs	10
1.9 Conclusion	11
<b>2 Modélisation Turboalternateur</b>	<b>12</b>
<b>Modélisation Turboalternateur</b>	<b>12</b>
2.1 Introduction	12
2.2 Modèle de la génératrice synchrone dans le repère abc	12
2.3 Hypothèses simplificatrices pour la modélisation	13
2.4 L'équation des flux magnétiques	14
2.5 La machine synchrone dans le repère dq0	16

2.6	Modèle de la machine en gradeur relative et en valeur réduite	18
2.6.1	Les courants en fonction des flux magnétiques :	20
2.6.2	Équation du couple électromagnétique :	21
2.7	Modélisation de turbine à gaz	21
2.8	RÉSULTATS DE LA SIMULATION	22
2.9	Interprétation des résultats	25
2.10	Conclusion	26
<b>3</b>	<b>Régulation du système et Implantation de l'intelligence artificiel</b>	<b>27</b>
3.1	Introduction	27
3.2	L'automatique voltage régulation (VAR)	27
3.3	stabilisateur de puissance (PSS)	29
3.4	régulateur PID	30
3.5	logique floue	30
3.6	simulation à base de régulateur foule	32
3.7	Turbo-alterateur connecté au réseau	33
3.8	synchronisation	33
3.9	RÉSULTATS DE LA SIMULATION	36
3.10	Conclusion	37

# List of Figures

1.1 CPP-UNIT	3
1.2 une image identique à la turbine utilisée	5
1.3 Cycle de Brayton dans un diagramme volume-pression	6
1.4 Excitation à 3 étage	8
2.1 Représentation des axes de la génératrice sur le repère abc	13
2.2 Schéma global turboalternateur en ilotage	22
2.3 Allures, tensions & courants	23
2.4 Allures des Puissances	24
2.5 Allure de la vitesse mesurée par rapport à la vitesse de référence	24
2.6 Allure de la tension instantanée	25
3.1 Schéma bloc d'ACIA	28
3.2 stabilisateur de puissance	30
3.3 Boucle de contrôle logic floue	31
3.4 La surface du Fuzzy	32
3.5 allure de vitesse turbine	32
3.6 schéma bloc synchronisation	34
3.7 Fonction logique du contrôleur de flux d'état selon aux paramètres de synchronisation.	35
3.8 schéma globale turboalternateur connecté au réseau avec la charge	35
3.9 allure des courants et tensions	36
3.10 Allures des vitesses	36
3.11 allure des puissances	37

# List of Tables

2.1 Valeurs réduites relatives sur l'axe (d-q) . . . . .	19
2.2 Tableau des paramètres . . . . .	22
2.3 Protocoles de charge en fonction du temps . . . . .	23
3.1 Tableau des règles FLC . . . . .	31
3.2 Protocoles de charge en fonction du temps . . . . .	36



# Introduction générale

Dans le cadre de mon projet de fin d'études, j'ai eu l'opportunité d'effectuer un stage pratique à la Raffinerie d'Alger, qui relève de l'activité de raffinage et de pétrochimie de SONATRACH. Plus précisément, j'ai travaillé à la station électrique de SONATRACH située à Sidi Arcine. Cette expérience m'a permis de comprendre les processus industriels et les systèmes de génération d'énergie électrique.

Pendant mon stage, j'ai visité plusieurs installations gérées par l'activité de raffinage, notamment le système de génération d'énergie électrique qui produit de l'électricité grâce à deux turbines (une turbine à gaz et une turbine à vapeur). Je me suis particulièrement intéressé à ce système de génération électrique afin de comprendre et d'analyser les conditions de fonctionnement des processus. Cette visite m'a permis de mieux comprendre les principes de base de la production d'énergie électrique et les équipements utilisés.

Les générateurs d'électricité sont des équipements essentiels et coûteux dont le bon fonctionnement affecte directement la stabilité du réseau. La panne d'un générateur peut entraîner une interruption de l'alimentation électrique, l'arrêt des machines, une perte de production et un manque à gagner pour l'entreprise. Ainsi, la maîtrise des systèmes industriels est cruciale pour une exploitation optimale et une politique de maintenance efficace. Dans les complexes industriels, les performances et l'optimisation des installations électriques sont de plus en plus exigeantes. L'établissement de modèles de calcul permettant de représenter fidèlement le comportement physique de ces installations est souvent nécessaire. Bien que les modèles analytiques puissent fournir des résultats rapidement, ils restent limités en termes de précision. L'avènement des outils informatiques et des logiciels de simulation a permis de développer des méthodes capables de reproduire le comportement temporel d'un réseau électrique à topologie variable pour divers régimes. Ils permettent également de modéliser des phénomènes tels que le couplage et le découplage des alternateurs, ainsi que de tester les algorithmes de contrôle et les techniques de commande et de régulation. Mon travail s'articule donc autour de la modélisation et de la simulation d'un réseau électrique industriel. Ce réseau comprend :

- Une source d'alimentation externe de SONELGAZ de 40 MW.
- Un alternateur de 31,5 MW.
- Des sous-stations électriques représentées par des disjoncteurs et des charges électriques variant entre 2,5 MW, 5 MW et 10 MW, représentant la station électrique de la raffinerie.

Mon travail comporte trois chapitres. Dans le premier chapitre, je donne un aperçu de l'entreprise SONATRACH ainsi que de la raffinerie d'Alger, avec une description des principaux éléments composant la raffinerie.

Dans le deuxième chapitre, je présente le modèle de la machine synchrone, partie intégrante du système de génération d'énergie électrique. Le modèle classique de cette machine est programmé dans plusieurs logiciels de simulation, tels que Matlab avec son interface Simulink. Pour la modélisation de la turbine, j'ai utilisé le modèle simplifié de Rowen, qui consiste en un ensemble d'équations algébriques décrivant les caractéristiques d'état stable d'une turbine à gaz.

dans ce chapitre en passant par une simulation du GTG en ilotage en appliquant des charges .

Dans le troisième chapitre, nous abordons la conception du système turbo-alterna avec une description du logiciel MATLAB ainsi qu'une étude comparative entre deux régulateurs (PID, FUZZY) avec la turbine uniquement.

Ensuite on simulera la GTG (Gas Turbine-Generator) qui connectée au réseau en mode (isochrone), tout en alimentant des charges via des disjoncteurs qui peuvent être contrôlés à la fermeture ou à l'ouverture, dans le but d'ajouter ou de délester ces charges, et ce afin d'étudier la réaction de la partie mécanique sur la partie électrique à travers l'évolution des paramètres : vitesse de rotation, puissances et tensions.

# Chapitre 1

## État de l'art

### 1.1 Introduction

Dans ce chapitre introductif, nous allons présenter l'entreprise SONATRACH et de sa raffinerie située à Alger. Nous débutons par une présentation générale, mettant en lumière les différents secteurs et départements techniques qui composent cette entité industrielle majeure. En particulier, nous explorerons en détail les éléments clés du système turbo-alternateur, un composant essentiel de l'infrastructure énergétique de la raffinerie. Nous nous attarderons sur l'alternateur lui-même, ainsi que sur son système d'excitation et le groupe turbine, dévoilant ainsi les rouages internes de cette technologie cruciale.

En outre, nous consacrerons une attention particulière aux systèmes de contrôle électrique indispensables pour assurer le bon fonctionnement et la gestion efficace des différentes stations et sous-stations au sein de la raffinerie. Ces systèmes représentent l'épine dorsale de l'exploitation sécurisée et efficiente des installations électriques, garantissant une production constante et fiable tout en répondant aux normes de sécurité les plus rigoureuses.

### 1.2 Présentation de l'entreprise

Dans cette section, nous nous attardons sur la nature et la portée de l'entreprise SONATRACH. Fondée sur des fondements historiques solides, SONATRACH incarne un pilier de l'économie nationale, étant une entreprise nationale de premier plan. Son héritage est profondément ancré dans le tissu économique et social du pays, reflétant son engagement envers le développement durable et la prospérité de l'Algérie.

Au-delà de ses frontières nationales, SONATRACH déploie son influence à l'échelle mondiale, affirmant sa position comme un acteur de premier plan dans l'industrie pétrolière et gazière. Sa présence sur la scène internationale est le résultat de décennies d'expertise, d'innovation et d'engagement envers l'excellence opérationnelle. En tant que tel, SONATRACH joue un rôle crucial dans la sécurisation des approvisionnements énergétiques mondiaux, contribuant ainsi à façonner le paysage énergétique mondial.

À travers ses activités, SONATRACH démontre un engagement indéfectible envers les normes les plus strictes en matière de sécurité, de durabilité environnementale et de responsabilité sociale. En combinant une vision stratégique à long terme avec une approche axée sur l'innovation et l'efficacité opérationnelle, SONATRACH s'affirme comme un leader incontesté de son secteur, façonnant l'avenir de l'industrie énergétique mondiale.

### 1.3 Description générale de la raffinerie d'Alger

La raffinerie d'Alger, située en Algérie et appartenant à SONATRACH, exploite actuellement une raffinerie de pétrole d'une capacité de 2,7 millions de tonnes métriques par an (MMTPA) à Alger. Cette installation se compose de plusieurs unités, notamment l'unité de distillation du brut, l'usine à gaz, l'unité de reformage catalytique, ainsi que des unités auxiliaires connexes comprenant les services publics et les installations hors site.

### 1.3.1 Historique

La raffinerie est implantée à Sidi-Arcine, à l'est d'Alger, à environ 10 km de l'aéroport et à 15 km du port d'Alger. Sa construction remonte à 1964, avec une capacité initiale de 1,6 MMTPA dédiée au traitement du pétrole brut de Hassi Messaoud. En 1970, sa capacité a été augmentée à 2,7 MMTPA.

Un projet de réhabilitation et d'adaptation de la raffinerie d'Alger a été entrepris dans le but principal de réorganiser certaines des unités existantes et d'intégrer de nouvelles unités. Cette initiative vise également à accroître la capacité de traitement du brut de la raffinerie de 35%. La réorganisation des unités existantes ainsi que des installations associées aux services publics et hors site sera améliorée et modifiée dans le cadre de ce projet.

### 1.3.2 Données techniques

Toutes les données techniques qui vont suivre se réfèrent aux documents techniques disponibles à la raffinerie d'Alger (sur le lieu de stage).[11]

### 1.3.3 Température de fonctionnement

La température de conception de l'équipement est la même pour l'extérieur ainsi que pour l'intérieur qui est de 40° C.

### 1.3.4 Données du réseau électrique

La fréquence est de 50 Hz avec trois niveaux de tensions : 60 kV, 20 kV, et 5.5 kV. Il y a également des tensions de 400 V et 380 V. Toutes les demandes d'électricité pour les installations de la raffinerie d'Alger sont gérées par un système électrique de production locale, avec des connexions supplémentaires au réseau électrique national de SONELGAZ.

## 1.4 Réseau électrique de la raffinerie

On trouve 11 sous-stations et chaque sous-station est divisée en 3 groupes.

**1er Groupe:** Sous-station avec interface SONELGAZ: SS-YARD (Sous-station de triage de commutation)

**2ème Groupe:** Les sous-stations principales qui sont (sont directement alimentées par CPP en fonctionnement normal):

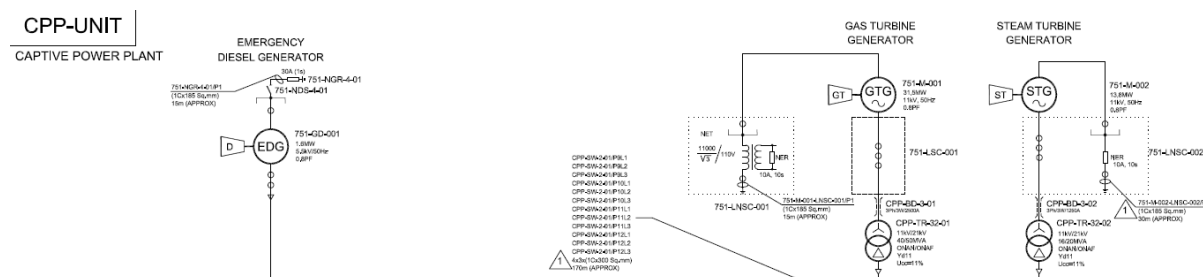


Figure 1.1: CPP-UNIT

- SS-CPP (Sous-station de central électrique captive)
- SS-11 (Sous-station de services publics existante)
- SS-12 (Nouvelle sous-station de services publics)
- SS-21 (Sous-station Usine ADU-Gaz)
- SS-22 (Sous-station RFCC)
- SS-23 (Sous-station du Bloc MS)

**3eme groupe :** Les sous-stations sous-distribuées (sont alimentées à partir d'une sous-station principale en fonctionnement normal):

- SS-32 (Nouvelle sous-station du parc de stockage)
- SS-24 (Sous-station SRU)
- SS-41 (Sous-station de l'usine de traitement des effluents)
- SS-51 (Administration Building Sub-station).

A partir du poste CPP, deux départs souterrains 20kV entièrement redondants alimentent le réseau principal des postes.

Après abaissement de la tension, les sous-stations sous-distribuées sont alimentées par deux départs souterrains entièrement redondants.

En cas d'arrêt de l'alimentation de l'unité, un diesel de génération de secours est raccordé au tableau de secours CPP-SW-4-02 situé au SS-CPP. La tension nominale du générateur est de 5,5 kV. Pendant la phase d'urgence, tous les appareillages 5,5kV et les transformateurs 5,5/LV sont alimentés par CPP-SW-4-02 via deux départs 100% redondants.

#### 1.4.1 Doublement de l'alimentation

- Ce doublement est assuré par : Réseau national à partir de 2 sources entrantes de 60kV (aérien sous terrain).
- Production d'électricité de l'usine avec un générateur à turbine à gaz (GTG) et un Générateur à turbine à vapeur (STG).

#### 1.4.2 Production d'énergie de l'usine

La production d'électricité est fournie par:

- Une GTG de 31,5MW et une STG de 13,8 MW.
- La tension de sortie de STG et GTG est de 3 phases, 11 kV, 50Hz.

La tension est ensuite élevée par un transformateur de 11kV à 20 kV et connectée à l'appareillage principal de distribution 20 kV.

#### 1.4.3 Système de distribution

L'alimentation électrique des réseaux nationaux est connectée au tableau principal de triage étiqueté YARD SW-1-01, type GIS. Cet appareillage est un double jeu de barres intérieur de type GIS avec tie break normalement fermé, alimenté par deux sources d'arrivée, l'une des deux arrivées connectées, pas de configuration en parallèle (sauf pendant le transfert momentané) :

- une ligne aérienne depuis El Harrach
- une ligne souterraine depuis El Harrach.

#### 1.4.4 Protection contre le retour d'énergie

Une protection contre le retour d'énergie de la raffinerie au réseau national est prévue. Elle est réalisée grâce à un relais de puissance directionnel qui fait partie de la protection 60 kV.

#### 1.4.5 Transformateurs abaisseurs:

Trois transformateurs abaisseurs, connectés au GIS, fournissent de l'énergie à la centrale lors du démarrage à vide ou lorsque cela est nécessaire pour compléter sa puissance de consommation. Tous ces transformateurs sont équipés de changeurs de prises en charge. De plus, les OLTC sont régulés par un relais de contrôle situé dans la sous-station (SS-YARD ou SS-11), permettant d'ajuster la tension de sortie en réponse à des fluctuations de charge ou de tension d'alimentation. L'objectif est de maintenir en permanence un niveau de tension secondaire aussi proche que possible de la valeur nominale.

### 1.4.6 Système de distribution HT (20 kV) (Appareillage de distribution principal en CPP)

Le tableau de distribution principal CPP-SW-2-01, opérant à 20 kV, comporte un GIS à double jeu de barres spécifiquement sélectionné pour cette application. Toutes les sources d'alimentation, qu'elles proviennent de la centrale ou du réseau, sont interconnectées directement à cet équipement, qui assure ensuite la redistribution vers les autres sous-stations. Chaque source d'alimentation, qu'il s'agisse de STG, GTG ou d'un transformateur 60/20 kV, est reliée à deux bus distincts, grâce aux sectionneurs motorisés à trois positions permettant une connexion à un seul bus à la fois. Chaque sortie est associée à un seul bus, et plusieurs systèmes de distribution sont en place, incluant l'appareillage à 20 kV dans la SS-23 et le système de distribution à 6,5 MV (5,5 kV).

### 1.4.7 Système de protection cathodique

Un système de protection cathodique électrique de type courant imposé est déployé pour prévenir la corrosion des éléments métalliques enterrés, incluant :

- Tuyauterie en acier
- Navires en acier enterrés
- Plaques inférieures des réservoirs de stockage.

## 1.5 Production d'électricité par turbine à gaz

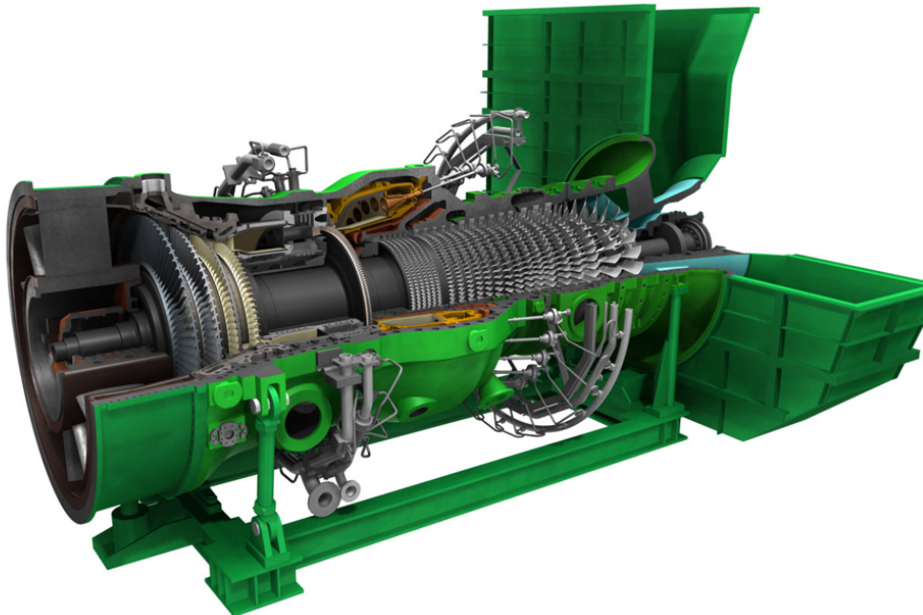


Figure 1.2: une image identique à la turbine utilisée

Les turbines à gaz, définies comme des turbomachines par Râteau, opèrent un échange d'énergie entre un rotor en rotation à vitesse constante et un flux continu de fluide. Elles sont également connues sous le nom de turbines à combustion et appartiennent à la catégorie des moteurs à combustion interne. Leur fonction principale est de convertir l'énergie contenue dans les hydrocarbures (comme le carburant ou le gaz) en énergie mécanique, manifestée par la rotation d'un arbre. [2]

### 1.5.1 Éléments principaux du Groupe turbine

Les turbines à gaz sont constituées de trois parties montées sur un même axe: **le compresseur, la chambre de combustion et la turbine**. La turbine à gaz fonctionne essentiellement comme un moteur

combustion interne, mais elle peut aussi être considérée comme un système autonome. Son processus commence par le compresseur qui aspire et comprime l'air atmosphérique. Ensuite, dans la chambre de combustion, l'énergie de l'air est amplifiée par la combustion du carburant, puis les gaz résultants se détendent dans la turbine, convertissant cette énergie en énergie mécanique. Cette énergie mécanique est ensuite transférée à une machine réceptrice via un accouplement, générant ainsi la puissance nécessaire pour un processus industriel. La turbine à gaz est composée d'un compresseur axial qui aspire l'air à la pression atmosphérique, d'une chambre de combustion où l'air comprimé est chauffé à pression constante par la combustion du combustible (comme le gaz naturel, le gazole ou le kérosène), et enfin d'une turbine qui permet la détente des gaz jusqu'à la pression atmosphérique.

### 1.5.2 Le fonctionnement de la turbine à gaz

Le fonctionnement de la turbine est résumé comme suit avec ce cycle de brayton

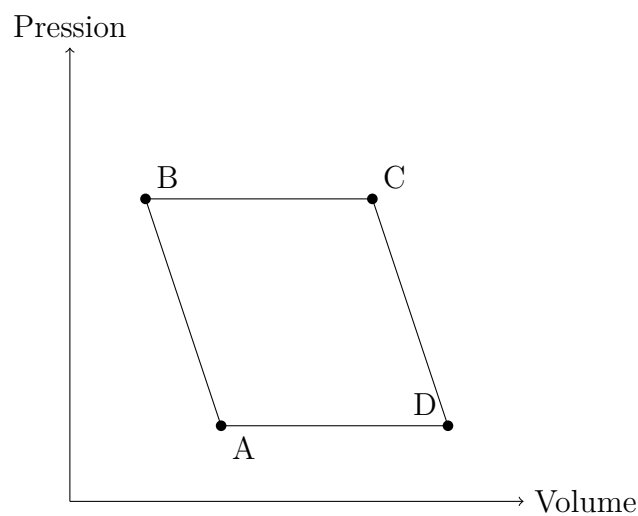


Figure 1.3: Cycle de Brayton dans un diagramme volume-pression

<b>Admission</b>	En A, l'air entre à la pression atmosphérique et à la température ambiante
<b>Compression</b> (A → B)	Lorsque l'air passe à travers le compresseur, sa pression et sa température augmentent et son volume diminue
<b>Combustion</b> (B → C)	En B, combustion. se produit à pression constante, tandis que lorsque l'apport de chaleur entraîne un volume important
<b>Expansion</b> (C → D)	le gaz à pression constante et à volume accru pénètre dans la turbine et s'y dilate. Lorsque les gaz traversent le rotor de la turbine, celui-ci transforme l'énergie cinétique en énergie mécanique. L'expansion des conduits augmente encore le volume et provoque une forte baisse de pression et de température
<b>échappement</b> (D → A)	les gaz seront libérés de la cheminée tandis que le volume et la pression continuent de chuter fortement

tableau 1.1 le cycle de bryton

### 1.5.3 Avantages des turbines à gaz

- **Puissance massique et volumique élevée** : Les turbines à gaz génèrent une grande quantité de puissance par unité de masse et de volume grâce à leur fonctionnement continu.
- **Simplicité de construction et bon équilibrage** : La conception des turbines à gaz est relativement simple, ce qui permet un bon équilibre mécanique.
- **Pollution limitée en NOx** : Grâce à un excès d'air et à une température de combustion limitée, les turbines à gaz produisent moins d'oxydes d'azote (NOx).
- **Récupération efficace de la chaleur** : Les turbines à gaz permettent une récupération efficace de la chaleur résiduelle, augmentant ainsi l'efficacité globale du système.
- **Longévité en fonctionnement stationnaire** : Elles ont une durée de vie prolongée lorsqu'elles fonctionnent en régime stationnaire.
- **Utilisation de combustibles variés** : Elles peuvent potentiellement utiliser une large gamme de combustibles, y compris ceux de moindre qualité.

### 1.5.4 Inconvénients des turbines à gaz

- **Taux de compression limité** : Le taux de compression est restreint par le nombre d'étages de compression nécessaires, ce qui peut limiter l'efficacité globale.
- **Rendement réduit des compresseurs à faible régime** : Les compresseurs centrifuges perdent en efficacité à des régimes inférieurs au régime nominal.
- **Température de combustion limitée** : La performance est contrainte par la résistance mécanique des matériaux de la turbine, ce qui limite la température de combustion.
- **Rendement réduit à charge partielle** : Le rendement diminue significativement à charge partielle, surtout pour les machines à simple arbre.
- **Coût élevé des aubages** : L'usinage des aubages, particulièrement pour la turbine, est coûteux en raison de la complexité et des matériaux utilisés.
- **Inaptitude aux arrêts et démarrages fréquents** : Les turbines à gaz ne sont pas bien adaptées aux arrêts et démarrages fréquents et peu progressifs, ce qui peut affecter leur performance et leur durabilité.

[3]

### 1.5.5 Le Démarrage et zone de fonctionnement

Le démarrage d'une turbine à gaz nécessite une source d'énergie externe pour lancer le compresseur et atteindre une vitesse suffisante pour que la combustion s'auto-alimente. Cette source peut être un moteur électrique, un convertisseur de fréquence ou le générateur lui-même. La vitesse de rotation des turbines varie généralement entre 2 000 et 10 000 tours par minute (tr/min).

### 1.5.6 Rendement et cycle combiné

Le rendement de conversion énergétique d'une centrale à turbine à gaz simple est d'environ 30%, les modèles les plus performants atteignant 40%. Une grande partie de l'énergie est perdue sous forme de chaleur dans les gaz d'échappement. Pour améliorer ce rendement, on peut recourir à un cycle combiné. Ce système récupère la chaleur des gaz d'échappement pour produire de la vapeur d'eau qui alimente une turbine à vapeur, augmentant ainsi le rendement global jusqu'à 55-60%.

### 1.5.7 Limites du cycle combiné

L'exploitation des turbines à gaz en mode cycle combiné présente des contraintes:

- Temps de démarrage plus long
- Nécessité de purge pour éviter les incendies et explosions
- Rampe de montée en puissance plus lente

La turbine à gaz est un moteur thermique performant et polyvalent qui trouve de nombreuses applications dans la production d'électricité, la propulsion aéronautique et d'autres domaines. Sa compréhension approfondie permet d'optimiser son fonctionnement et de minimiser son impact environnemental.

## 1.6 Machine synchrone avec excitation à 3 étages

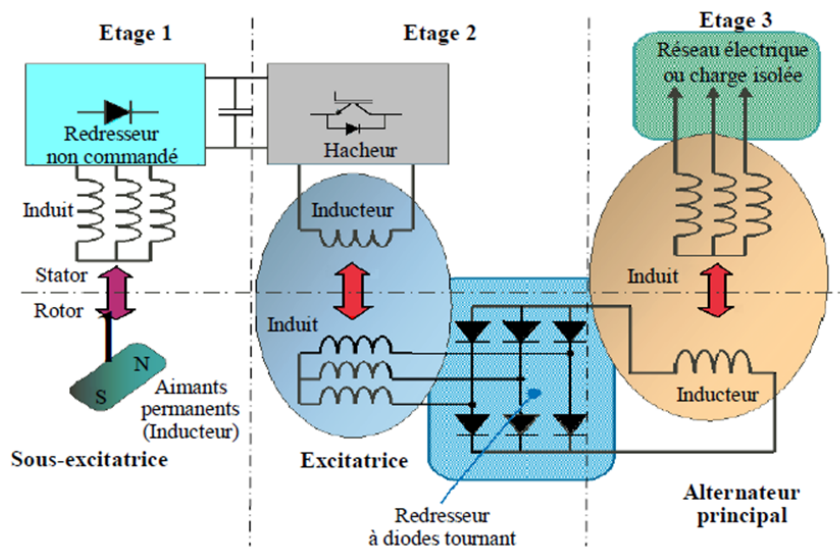


Figure 1.4: Excitation à 3 étage

Le terme de machine synchrone regroupe toutes les machines dont la vitesse de rotation de l'arbre de sortie est égale à la vitesse de rotation du champ tournant. Pour obtenir un tel fonctionnement, le champ magnétique rotorique est généré soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation. La position du champ magnétique rotorique est alors fixe par rapport au rotor, ce qui impose en fonctionnement normal une vitesse de rotation identique entre le rotor et le champ tournant statorique. Cette famille de machine regroupe en fait plusieurs sous familles, qui vont de l'alternateur de plusieurs centaines de mégawatts au moteur de quelques watts, en passant par les moteurs pas à pas. Néanmoins, la structure de toutes ces machines est relativement proche.

### 1.6.1 Principe de fonctionnement

Le fonctionnement des machines synchrones repose sur l'interaction entre un champ magnétique rotorique et un champ magnétique statorique. Ce champ rotorique, généré par des aimants permanents ou un circuit d'excitation, induit une force électromotrice (fém) dans le stator, composé d'un enroulement triphasé réparti dans des encoches. La synchronisation entre la vitesse de rotation du rotor et celle du champ tournant est essentielle pour garantir un fonctionnement optimal.[4]

### 1.6.2 Structure de Machine Synchrone

La structure des machines synchrones à 3 étages se compose de deux éléments principaux



## Stator

Le composant fixe de la machine, similaire à celui d'une machine asynchrone triphasée, accueille les enroulements statoriques, également désignés comme enroulements induits lorsqu'elle fonctionne en tant que générateur, car ils conduisent des courants alternatifs. Les conducteurs sont disposés dans des rainures autour de la structure de la machine et regroupés en bobines. Dans une configuration triphasée, le stator est composé de trois enroulements monophasés identiques, décalés de 120° et présentant chacun  $p$  paires de pôles magnétiques.[5]

## Rotor

Ces machines possèdent un enroulement inducteur monophasé composé de bobines enroulées autour de pôles ferromagnétiques et connectées en série pour alterner les pôles. La forme de l'épanouissement polaire est ajustée pour obtenir une distribution d'induction dans l'entrefer qui se rapproche d'une sinusoïde. Cette conception se distingue par sa simplicité de fabrication et d'entretien.

La principale complexité dans l'étude de ces machines réside dans l'anisotropie géométrique du rotor, ce qui entraîne une variation de l'entrefer, et donc de l'induction magnétique, en fonction de la position du rotor par rapport au stator. En conséquence, les réactances mutuelles et la plupart des inductances dépendent de cette position. La réaction de l'induit varie également en fonction de la charge de la machine

### 1.6.3 Avantages des machines synchrones :

- **rendement** : Les machines synchrones présentent généralement un rendement élevé, les rendant particulièrement adaptées aux applications nécessitant une grande efficacité énergétique.
- **La Large plage de vitesse** : Les machines synchrones peuvent fonctionner sur une large plage de vitesses, ce qui les rend adaptables à diverses applications

### 1.6.4 Applications des machines synchrones :

Production d'électricité : Les alternateurs synchrones sont largement utilisés dans les centrales électriques pour la production d'électricité.

Propulsion de navires : Les moteurs synchrones à grande vitesse sont utilisés pour la propulsion de navires, notamment les paquebots et les sous-marins.

Pompage : Les moteurs synchrones sont également utilisés dans les pompes pour le transport de fluides.

Industrie : Les machines synchrones trouvent de nombreuses applications dans l'industrie, notamment dans les machines-outils et les compresseurs.

### 1.6.5 Amortisseur

Les machines à rotor bobiné sont souvent munies d'amortisseurs. Ce sont des barres de cuivre placées dans des encoches à la périphérie des pôles et reliées entre elles pour former une portion de cage ou une cage complète analogue à celle d'un moteur asynchrone. Les amortisseurs s'opposent aux oscillations consécutives aux changements brusques de fonctionnement.

Le générateur est une machine synchrone à pôles saillants à excitation séparée à 3 étages, sans balai, et un aimant permanent pour l'alimentation de l'AVR.

## 1.7 Groupe d'excitation

Pour le fonctionnement d'un turboalternateur, on doit faire appel à une source d'énergie externe. L'excitatrice remplit cette fonction. Il s'agit d'un accouplement mécanique du rotor (l'induit) d'une excitatrice principale triphasée à l'inducteur de turboalternateur, par l'intermédiaire d'un pont de diode tournant, fixé sur le même arbre, qui alimente les enroulements inducteurs de l'alternateur par du courant continu. L'excitatrice principale, elle-même, est excitée par une excitatrice pilote à aimant permanent.

### 1.7.1 Description du groupe d'excitation

Dans la majorité des groupes et systèmes d'excitation, l'ensemble est constitué d'une génératrice à aimant permanent (PMG), d'une excitatrice synchrone et d'un pont redresseur tournant. Le groupe d'excitation est représenté à la figure

### 1.7.2 Pilotage d'excitatrice triphasée

L'excitatrice pilote triphasée est un dispositif d'excitation électrique composé d'un alternant à plusieurs paires de pôles dans le stator. Ce dernier est fabriqué à partir de tôles magnétiques et comprend un enroulement triphasé. Quant au rotor, il est constitué de la roue polaire et des pôles saillants, chacun équipé d'un aimant permanent.

L'excitatrice principale, quant à elle, est un alternateur triphasé à inducteur fixe (rotor). L'inducteur abrite les pôles de l'enroulement inducteur ainsi que l'enroulement amortisseur, composé de barres logées à la surface des épanouissements polaires. L'enroulement induit est logé dans les encoches du rotor. La tension triphasée induite dans le rotor est redressée par des diodes, fournissant ainsi le courant d'excitation à l'alternateur.

Les systèmes d'excitation actuels utilisent des dispositifs sans balais, comprenant un alternateur exciteur et un groupe de redresseurs (pont à diodes). Ces redresseurs, constitués de diodes au silicium protégés par des fusibles, forment un pont triphasé à diode. Pour éviter les brusques variations de tension lors de la commutation, des circuits RC sont intégrés aux roues à diodes.

Le groupe d'excitation est refroidi par air dans un circuit fermé. L'air chaud est ensuite refroidi dans deux réfrigérants situés en partie haute du groupe. On trouve le ventilateur est monté sur l'arbre du groupe, pour qu'il assure le refroidissement en voyant de l'air froid directement vers l'excitatrice via une configuration appropriée de l'enveloppe. Le pont à diodes sont entourées d'une enveloppe et bénéficient d'une auto-ventilation grâce à un guidage précis de l'air.

L'excitatrice pilote est positionnée sur le chemin de l'air de refroidissement, mais nécessitant une quantité moindre d'air, aucune communication spéciale n'est prévue entre cette excitatrice et la zone d'air chaud. Ce système de ventilation de secours est également prévu pour éviter toute interruption du fonctionnement du groupe d'excitation en cas de dysfonctionnement des réfrigérants.

## 1.8 Système de commande électrique (ECS)

Les principales fonctions du système de commande électrique peuvent être classées en trois grands domaines:

I. Fonctions de contrôle et de surveillance de la distribution du réseau électrique (gestion des disjoncteurs manuels, gestion ATS, séquences d'urgence).

II. Fonctions du système de gestion de l'énergie (répartition de la charge et délestage).

III. Fonctions de supervision, de contrôle et d'acquisition de données (surveillance des interfaces).

Une fonction cruciale de l'ECS est la "détermination de la configuration du réseau". Elle analyse en continu la configuration du réseau électrique, déterminée par l'état des disjoncteurs de ligne, des bus de couplage et des disjoncteurs de générateur.

Cette fonction revêt une grande importance car de nombreuses autres fonctions en dépendent, telles que le séquençage automatique, le contrôle de la puissance active et réactive, ainsi que le contrôle des transformateurs et des générateurs.

### 1.8.1 Point de synchronisation des disjoncteurs

- A distance de l'ECS, l'opérateur peut initier la synchronisation sur cinq disjoncteurs:

Arrivée du GTG au tableau de distribution CPP-SW-2-01 (20kV GIS)

Entrée STG au tableau de distribution CPP-SW-2-01 (20kV GIS)

Arrivée du transformateur 60/20kV au tableau CPP-SW-2-01 (à partir de YARD-TR- 12-01A)

Entrée du transformateur 60/20kV au tableau CPP-SW-2-01 (à partir de YARD-TR- 12-01B)

Arrivée de l'EDG au tableau CPP-SW-4-02. Chaque générateur (GTG, STG et EDG) possède son propre dispositif de synchronisation. Le dispositif de synchronisation de l'EDG gère la fermeture du CB19 (sur un bus bar mort en cas d'urgence ou sur un bus bar actif en cas de maintenance) une fois qu'une séquence de synchronisation est initiée par l'ECS. Le dispositif de synchronisation STG gère la fermeture du CB10 dès qu'une séquence de synchronisation est initiée par l'ECS. Le dispositif de synchronisation

GTG gère la fermeture des disjoncteurs CB7, CB8 et CB9 lorsqu'une séquence de synchronisation est initiée par l'ECS en fonction du disjoncteur sélectionné.

## 1.9 Conclusion

nous avons entamé une exploration approfondie du domaine de la production d'énergie électrique au sein de Sonatrach, en mettant particulièrement l'accent sur la centrale connectée au réseau utilisant un générateur et une turbine à gaz. Notre choix de Sonatrach pour cette étude découle de sa position de leader dans le domaine de l'énergie en Algérie, ainsi que de son engagement envers l'innovation et la technologie dans la production d'électricité.

Nous avons examiné les raisons pour lesquelles Sonatrach opte pour l'utilisation de cette centrale, mettant en évidence les avantages du gaz naturel dans la production d'énergie, notamment sa disponibilité, sa fiabilité et son faible impact environnemental. La décision de Sonatrach d'investir dans ce type de centrale témoigne de sa vision à long terme en matière de développement énergétique durable.

En outre, nous avons identifié l'importance de notre travail pour Sonatrach, qui réside dans la nécessité de modéliser et simuler efficacement le générateur et la turbine à gaz connectés au réseau afin d'optimiser les opérations, d'améliorer la performance et de garantir la sécurité des installations.

Quant au choix de la machine synchrone, il repose sur sa capacité à fournir une puissance stable et à s'adapter aux variations de charge, ce qui en fait un élément clé dans le système de génération électrique de la centrale.

ce premier chapitre a jeté les bases de notre étude en présentant le contexte général de notre travail au sein de Sonatrach et en soulignant l'importance de la modélisation et de la simulation pour optimiser les performances des générateurs de turbines à gaz. Dans le prochain chapitre, nous nous concentrerons sur la modélisation de la machine synchrone et la turbine à gaz, des éléments essentielles qui forment le système, en vue d'améliorer notre compréhension et nos capacités de simulation.

## Chapitre 2

# Modélisation Turboalternateur

### 2.1 Introduction

Les machines synchrones sont des machines dont la vitesse de rotation de l'arbre de sortie correspond à celle du champ tournant. Ce fonctionnement est obtenu en générant un champ magnétique rotorique à l'aide d'aimants ou d'un circuit d'excitation. Dans ce cas, la position du champ magnétique rotorique reste fixe par rapport au rotor, assurant une vitesse de rotation identique entre le rotor et le champ tournant statorique en conditions normales. La structure de ces machines est généralement similaire, avec un stator composé de trois enroulements triphasés répartis pour produire des forces électromotrices sinusoïdales ou trapézoïdales grâce à la rotation du champ rotorique. Les rotors, qui sont responsables de la génération du champ magnétique rotorique, se divisent en trois grandes familles : les rotors bobinés à pôles lisses, les rotors bobinés à pôles saillants et les rotors à aimants [7]

Dans ce chapitre, nous aborderons la modélisation mathématique d'une machine synchrone à inducteur bobiné à pôles saillants. Ensuite, nous examinerons le modèle de la turbine à gaz de Rowen. à l'aide de logiciel Matlab en utilisant les bibliothèques simulink et SimPower system

### 2.2 Modèle de la génératrice synchrone dans le repère abc

Le modèle de la génératrice synchrone à pôles saillants dans le repère abc comporte trois enroulements statoriques identiques a, b et c, décalés de  $120^\circ$  électriques. Le rotor est équipé d'un enroulement d'excitation et de deux enroulements amortisseurs fictifs répartis selon deux axes particuliers :

**L'axe direct (d)**, qui coïncide avec l'axe de l'enroulement d'excitation et inclut un amortisseur fictif supplémentaire.

**L'axe en quadrature (q)**, en retard de  $90^\circ$  électriques sur l'axe d, qui possède aussi un amortisseur fictif.

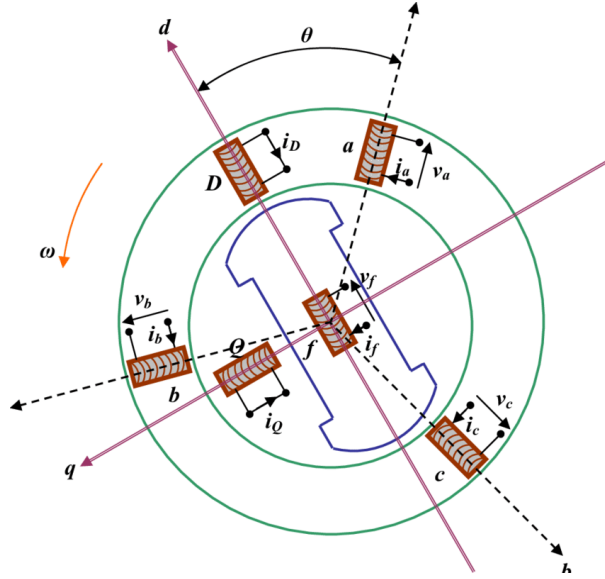


Figure 2.1: Représentation des axes de la génératrice sur le repère abc

La Figure(2.1) illustre ce modèle simplifié, avec les bobinages D et Q représentant les amortisseurs fictifs sur les axes d et q, et les bobinages a, b, c les phases statoriques. L'angle  $\theta$  est la position angulaire du rotor par rapport au stator. Ce modèle abc prend en compte la saturation et les amortisseurs, permettant une représentation précise de la machine. Les équations électriques s'expriment alors sous forme matricielle, comme indiqué précédemment.[8]

### 2.3 Hypothèses simplificatrices pour la modélisation

La modélisation de la génératrice synchrone à rotor bobiné et avec pôles saillants repose sur plusieurs hypothèses simplificatrices pour simplifier les calculs. Tout d'abord, on suppose que la saturation du circuit magnétique, l'hystérésis et les courants de Foucault sont négligeables. Cette simplification permet d'exprimer le flux magnétique en fonction des courants électriques et des inductances propres et mutuelles du système. De plus, on considère que les résistances des enroulements statoriques et rotoriques restent constantes quelle que soit la variation de la température. Une autre hypothèse est que l'effet de peau reste constant indépendamment du glissement ou de la fréquence. Enfin, la distribution de la force magnétomotrice est supposée être sinusoïdale. En résumé, ces hypothèses simplificatrices permettent de créer un modèle mathématique plus gérable pour l'analyse de la génératrice synchrone, en négligeant certains phénomènes et en supposant des conditions idéales pour faciliter les calculs.[9]

Les équations électriques du stator peuvent être représentées de la manière suivante :

$$\begin{cases} U_{as} &= -R_s i_{as} + \frac{d\psi_{as}}{dt} \\ U_{bs} &= -R_s i_{bs} + \frac{d\psi_{bs}}{dt} \\ U_{cs} &= -R_s i_{cs} + \frac{d\psi_{cs}}{dt} \end{cases} \quad (2.1)$$

La matrice de la résistance statorique:

$$\mathbf{R}_s = \begin{pmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{pmatrix}$$

## 2.4 L'équation des flux magnétiques

]

L'équation des flux magnétiques d'une machine synchrone au stator relie les flux du stator ( $\psi_{sa}, \psi_{sb}, \psi_{sc}$ ) en fonction des inductances propres et mutuelles. Elle peut être représentée de la manière suivante [10]:

$$\begin{pmatrix} \psi_{sa} \\ \psi_{sb} \\ \psi_{sc} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_{aa} & M_{ab} & M_{ac} & M_{af} & M_{akd} & M_{akq} \\ M_{ba} & L_{bb} & M_{bc} & M_{bf} & M_{bkd} & M_{bkq} \\ M_{ca} & M_{cb} & L_{cc} & M_{cf} & M_{ckd} & M_{ckq} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{i}_{sa} \\ \dot{i}_{sb} \\ \dot{i}_{sc} \\ \dot{i}_f \\ \dot{i}_{kd} \\ \dot{i}_{kq} \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

où  $\psi_{sa}, \psi_{sb}, \psi_{sc}$  sont les flux magnétiques du stator,  $L_{ij}$  représente les inductances propres et mutuelles, et  $\dot{i}_{sa}, \dot{i}_{sb}, \dot{i}_{sc}, \dot{i}_f, \dot{i}_{kd}, \dot{i}_{kq}$  sont les courants correspondants. Les flux du stator sont définis de la manière suivante :

$$\psi_s = \begin{pmatrix} \psi_{sa} \\ \psi_{sb} \\ \psi_{sc} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \psi_{sa} \\ \psi_{sb} \\ \psi_{sc} \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} l_{aa} & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ba} & l_{bb} & M_{bc} \\ M_{ca} & M_{cb} & l_{cc} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{i}_a \\ \dot{i}_b \\ \dot{i}_c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} M_{af} & M_{akd} & M_{akq} \\ M_{bf} & M_{bkd} & M_{bkq} \\ M_{cf} & M_{ckd} & M_{ckq} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{i}_f \\ \dot{i}_{kd} \\ \dot{i}_{kq} \end{pmatrix} \quad (2.3)$$

La matrice d'inductance  $l_{rs}$ , qui représente l'inductance mutuelle entre le stator et le rotor dans le contexte des machines synchrones, est définie comme suit :

$$l_{sr} = l_{rs} = \begin{pmatrix} M_{af} & M_{bf} & M_{cf} \\ M_{akd} & M_{bkd} & M_{ckd} \\ M_{akq} & M_{bkq} & M_{ckq} \end{pmatrix} \quad (2.4)$$

Cette matrice carrée d'ordre 3 illustre les interactions magnétiques entre le stator et le rotor, influençant les flux magnétiques et les courants dans le système. L'inductance mutuelle  $l_{rs}$  joue un rôle crucial dans la modélisation et le fonctionnement des machines synchrones, en permettant de quantifier les couplages magnétiques entre les deux parties de la machine.

La compréhension et la manipulation de la matrice d'inductance  $l_{rs}$  sont essentielles pour analyser et optimiser les performances des machines synchrones, en particulier en ce qui concerne la transmission d'énergie électrique et le contrôle des flux magnétiques dans le système.

Les inductances statorique et rotorique sont représentées sous forme matricielle :

### Inductances Statorique

Inductance statorique  $l_{ss}$  :

$$l_{ss} = \begin{pmatrix} l_{aa} & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ba} & l_{bb} & M_{bc} \\ M_{ca} & M_{cb} & l_{cc} \end{pmatrix} \quad (2.5)$$

Les relations entre les flux du stator et les inductances peuvent être exprimées comme suit :

$$\begin{cases} \psi_s &= -l_{ss}i_s + l_{sr}i_r \end{cases} \quad (2.6)$$

Ces équations décrivent comment les flux du stator sont influencés par les courants statoriques, en prenant en compte les inductances propres et mutuelles des deux parties de la machine synchrone.

$\psi_s$  : le flux statorique

$l_{ss}$  : inductance statorique

### Transformation de Park

La transformation de Park est une étape essentielle pour passer d'un modèle triphasé à un modèle diphasé simplifié dans l'analyse des machines synchrones. Cette transformation, définie par une matrice, permet de projeter les grandeurs du repère triphasé abc sur les axes d et q d'un repère tournant.[11]

La matrice de transformation de Park est donnée par :

$$P(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \quad (2.7)$$

Cette transformation s'applique à chaque jeu de grandeurs, qu'elles soient statoriques ou rotoriques, afin de simplifier les équations et le modèle global de la machine synchrone. Il est crucial que les repères de transformation de Park pour les grandeurs statoriques et rotoriques soient alignés. Cela est assuré par l'alignement des angles  $\theta_s$  et  $\theta_r$ , notés respectivement  $\theta_s$  et  $\theta_r$  selon la relation :

$$\theta + \theta_r = \theta_s \quad (2.8)$$

La transformation de Park permet de passer de  $[X]_{abc}$  dans le repère triphasé abc à  $[X]_{dq0}$  dans le repère diphasé dq0 lié au rotor tournant à la vitesse angulaire  $\theta_s$  :

$$[X]_{dq0} = P(\theta)[X]_{abc} \quad (2.9)$$

La transformation inverse, permettant de revenir du repère dq0 au repère abc, est donnée par :

$$[X]_{abc} = P(\theta_s)^{-1}[X]_{dq0} \quad (2.10)$$

Où  $P(\theta_s)^{-1}$  est la matrice inverse de  $P(\theta)$  définie par :

$$P(\theta)^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos \theta_s & -\sin \theta_s & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta_s - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta_s - \frac{4\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \quad (2.11)$$

La transformation de Park permet de simplifier grandement les équations de la machine synchrone en projetant les grandeurs dans un repère tournant lié au rotor. Elle est donc un outil essentiel pour l'analyse et la commande des machines synchrones.

## 2.5 La machine synchrone dans le repère dq0

Dans le repère dq0, les équations des tensions pour l'enroulement statorique peuvent être exprimées de manière condensée comme suit [12] :

$$[V_s] = -[R_s][I_s] + \frac{d}{dt}[\Psi_s] \quad (2.12)$$

En utilisant la matrice inverse de Park,  $P(\theta)^{-1}$ , on peut écrire l'équation des tensions dans le repère dq0 comme :

$$P(\theta)^{-1}[V_{dq0}] = -[R][P(\theta)^{-1}][I_{dq0}] + \frac{d}{dt}([\psi_{dq0}]P^{-1}) \quad (2.13)$$

En multipliant cette équation par  $P(\theta)$ , on obtient :

$$[V_{dq0}] = -[R][I_{dq0}] + P(\theta) \frac{d}{dt}([\psi_{dq0}]P^{-1}) \quad (2.14)$$

D'où :

$$P(\theta) \frac{d}{dt}([\psi_{dq0}]P^{-1}) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \times \frac{d}{dt} \left( \psi_{dq0} \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \right) \quad (2.15)$$

ci-dessous le développement complet de l'équation en détail :

$$= \sqrt{\frac{2}{3}} \times \begin{pmatrix} \cos^2 \theta + \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin \theta \cos \theta - \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \frac{\cos(\theta) + \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) + \cos(\theta - \frac{4\pi}{3})}{\sqrt{2}} \\ -\sin^2 \theta - \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin \theta \cos \theta - \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \frac{-\sin(\theta) + \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) + \sin(\theta - \frac{4\pi}{3})}{\sqrt{2}} \\ \frac{\cos(\theta) + \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) + \cos(\theta - \frac{4\pi}{3})}{\sqrt{2}} & \frac{-\sin(\theta) + \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) + \sin(\theta - \frac{4\pi}{3})}{\sqrt{2}} & \frac{3}{2} \end{pmatrix} \times \left( \frac{d\phi_{dq0}}{dt} \right)$$

En utilisant les identités trigonométriques suivantes :



$$\begin{cases} \cos^2 \theta + \sin^2 \theta = 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) = -\frac{1}{2} \cos \theta - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \theta \\ \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) = -\frac{\sqrt{3}}{2} \cos \theta - \frac{1}{2} \sin \theta \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) = -\frac{1}{2} \cos \theta + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \theta \\ \sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) = -\frac{\sqrt{3}}{2} \cos \theta - \frac{1}{2} \sin \theta \\ \cos(\theta) + \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) + \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) = 0 \\ \sin(\theta) + \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) + \sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) = 0 \end{cases} \quad (2.16)$$

On obtient finalement :

$$P(\theta) \frac{d}{dt}([\phi_{dq0}]P^{-1}) = \frac{d\theta}{dt} \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \phi_{dq0} \quad (2.17)$$

En développant l'équation de tension rotorique, nous obtenons les équations suivantes :

$$\begin{cases} V_d = -R_s i_d - \frac{d\psi_d}{dt} + \frac{d\theta}{dt} \psi_q \\ V_q = -R_s i_q - \frac{d\psi_q}{dt} - \frac{d\theta}{dt} \psi_d \\ V_f = R_f i_f + \frac{d\psi_f}{dt} \end{cases} \quad (2.18)$$

Ces équations sont basées sur les flux magnétiques réduits  $\psi_d$ ,  $\psi_q$  et  $\psi_f$ , définis comme suit :

$$\begin{cases} \psi_d = -L_d I_d + M_f I_f \\ \psi_q = -L_q I_q \\ \psi_f = -L_f I_f + M_f I_d \end{cases} \quad (2.19)$$

Après la transformation de Park, ces équations peuvent être représentées de manière matricielle comme suit :

$$\begin{pmatrix} \psi_d \\ \psi_q \\ \psi_f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -L_d & 0 & M_f \\ 0 & -L_q & 0 \\ M_f & 0 & -L_f \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_d \\ I_q \\ I_f \end{pmatrix} \quad (2.20)$$

En substituant les flux dans les équations, nous obtenons les équations de tensions suivantes :

$$\begin{cases} V_d = -R_s i_d - L_d \frac{dI_d}{dt} + M_f \frac{dI_f}{dt} + \omega L_q I_q \\ V_q = -R_s i_q - L_q \frac{dI_q}{dt} - \omega L_d I_d + \omega M_f I_f \\ V_f = R_f i_f + L_f \frac{dI_f}{dt} + M_f \frac{dI_d}{dt} \end{cases} \quad (2.21)$$

L'équation des flux sous forme matricielle :

$$\begin{pmatrix} V_d \\ V_q \\ V_f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -R_s & 0 & 0 \\ 0 & -R_s & 0 \\ 0 & 0 & -R_f \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_d \\ I_q \\ I_f \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -L_d & 0 & M_f \\ 0 & -L_q & 0 \\ M_f & 0 & L_f \end{pmatrix} \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} I_d \\ I_q \\ I_f \end{pmatrix} + \omega_e \begin{pmatrix} 0 & L_q & M_f \\ L_d & 0 & M_f \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_d \\ I_q \\ I_f \end{pmatrix} \quad (2.22)$$

$$[V] = [R][I] + \frac{d[I]}{dt}[L][I] + \omega_e[A][I] \quad (2.23)$$

**Établissement du couple électromagnétique:** L'expression du couple électromagnétique  $C_{em}$  est obtenue à partir de la puissance instantanée  $P_{IN}$  de la machine synchrone. En utilisant la convention générateur au stator, la puissance instantanée s'écrit :

$$P_{IN} = V_a I_a + V_b I_b + V_c I_c + V_f I_f \quad (2.24)$$

Lorsque l'on applique la transformation de Park aux tensions statoriques pour les projeter dans un repère  $dq0$  lié au rotor tournant à la vitesse angulaire  $\omega_r$ , l'équation de la puissance électromagnétique s'écrit :

$$P_{IN} = V_d I_d + V_q I_q + 3V_0 I_0 + V_f I_f \quad (2.25)$$

Le couple électromagnétique  $C_{em}$  est alors donné par :

$$P_{em} = \omega_e (\phi I_d - \phi_q I_q) \quad (2.26)$$

Où  $\omega_e = p\omega_r$  et  $p$  est le nombre de paires de pôles. Sous forme de couple, on a :

$$C_{em} = \frac{P_{em}}{\omega_m} = p\omega_r (\phi I_d - \phi_q I_q) \quad (2.27)$$

Cette équation relie le couple électromagnétique aux flux et courants dans les axes  $d$  et  $q$ . L'équation mécanique s'écrit :

$$C_m - C_{em} = j \frac{d\omega_r}{dt} + f\omega_r \quad (2.28)$$

Où  $C_m$  est le couple mécanique appliqué,  $j$  est le moment d'inertie des parties tournantes et  $f$  est le coefficient de frottement visqueux.

## 2.6 Modèle de la machine en gradeur relative et en valeur réduite

Le système par unité (p.u.) est une méthode répandue pour analyser les systèmes électriques. Elle permet de normaliser les variables et de simplifier les calculs en éliminant les unités réelles. Les grandeurs électriques du système international d'unités (SI) sont converties en p.u. en référence à des valeurs de base Xb dans le SI. Certaines valeurs de base sont choisies indépendamment, d'autres dépendent des relations entre les grandeurs du système. Les valeurs de base sont généralement sélectionnées pour que les principales quantités électriques, comme les tensions, soient égales à 1 p.u. dans les conditions nominales. Dans le cas des générateurs synchrones, le système p.u. élimine des constantes arbitraires, simplifiant ainsi l'obtention de circuits équivalents.[13]

En effet, la notion de valeur réduite et celle des grandeurs nominales sont associées entre elles. Dans notre cas, qui est celui d'un alternateur, plusieurs caractéristiques peuvent être mentionnées. La tension nominale entre le neutre et la phase  $V_n$ , d'où la tension nominale se compose entre deux phases  $U_n$ .

$$V_n = \frac{U_n}{\sqrt{3}} \quad (2.29)$$

La puissance apparente nominale  $S_n$ :

$$S_n = 3V_n I_n = \sqrt{3}U_n I_n \quad (2.30)$$

Le courant nominal  $I_n$  qui est défini par le courant de ligne.

On a aussi l'impédance nominale  $Z_n$ :

$$Z_n = \frac{U_n}{I_n} \quad (2.31)$$

Les avantages de l'utilisation des valeurs réduites sont les suivants :

- Les ordres de grandeur des impédances en valeur réduite au sein d'une famille de machines sont peu variables d'une machine à l'autre. Ainsi, l'utilisation des valeurs réduites permet de mieux apprécier et interpréter les similitudes ainsi que les différences dans le comportement de ces machines.
- Les courants et les tensions en valeur réduites diminuent rapidement une estimation de l'importance des contraintes résultant du régime étudié.

Grandeur	Valeur réduite (p.u)
Tension $V_d$	$\frac{V_d}{\sqrt{2}V_n}$
Tension $V_q$	$\frac{V_q}{\sqrt{2}V_n}$
Courant $I_d$	$\frac{I_d}{\sqrt{2}I_n}$
Courant $I_q$	$\frac{I_q}{\sqrt{2}I_n}$
Puissance active $P_a$	$\frac{P_n}{3V_n I_n}$
Flux $\phi_d$	$\frac{\phi_d}{\phi_{\text{ref}}\omega_s}$
Flux $\phi_q$	$\frac{\phi_q}{\phi_{\text{ref}}\omega_s}$
Couple $C_n$	$\frac{3V_n I_n}{\omega_s} = \frac{3V_n I_n C_n}{C_{\text{ref}}}$

Table 2.1: Valeurs réduites relatives sur l'axe (d-q)

$$\begin{aligned} \phi &= \omega_b \cdot \phi \\ \chi &= \omega_b \cdot L \end{aligned} \quad (2.32)$$

Après avoir effectué ces différentes transformations, nous obtenons les équations de flux suivantes :

**Équations de flux statoriques  $\phi_d$  et  $\phi_q$ :**

$$\begin{aligned} \phi_d &= \omega_b \int \left( V_d + \frac{\omega_r}{\omega_b} \phi_q + \frac{r_s}{\chi l s} (\phi_m d - \phi_d) \right) dt \\ \phi_q &= \omega_b \int \left( V_q + \frac{\omega_r}{\omega_b} \phi_d + \frac{r_s}{\chi l s} (\phi_m q - \phi_q) \right) dt \end{aligned} \quad (2.33)$$

Ces équations différentielles intégrales expriment la variation temporelle des flux statoriques directs et en quadrature en fonction des tensions, courants, résistances et inductances de la machine.

### Équation de flux homopolaire $\phi_0$ :

Cette équation décrit l'évolution du flux homopolaire en fonction de la tension homopolaire et de la résistance statorique.

$$\phi_0 = \omega_b \int (V_0 - \frac{r_s}{\chi_{ls}}(\phi_0)) dt \quad (2.34)$$

### Équations de flux des circuits amortisseurs $\phi'_{kd}$ et $\phi'_{kq}$ :

Ces équations modélisent les flux dans les circuits amortisseurs en fonction des flux mutuels et des résistances et inductances de fuite.

$$\begin{cases} \phi'_{kd} = \frac{(\omega_b r'_{kd})}{x'_{lkd}} \int ((\phi_{md} - \phi_{kd})) dt \\ \phi'_{kq} = \frac{(\omega_b r'_{kq})}{x'_{lkq}} \int ((\phi_{mq} - \phi_{kq})) dt \end{cases} \quad (2.35)$$

### Équation de flux d'excitation $\phi'_f$ :

Cette équation décrit le flux d'excitation en fonction de la tension d'excitation, des flux mutuels et des paramètres du circuit d'excitation.

$$\phi'_f = \frac{(\omega_b r'_f)}{x'_{md}} \int (E_f + \frac{(x'_{md})}{\chi'_{lf}}(\phi_{md} - \phi'_f)) dt \quad (2.36)$$

Avec :

### L'équation des flux mutuels $\phi_{md}$ et $\phi_{mq}$ :

Ces équations algébriques expriment les flux mutuels statoriques en fonction des flux et courants dans les différents enroulements.

$$\begin{cases} \phi_{md} = \omega_b L_{md}(i_q + i_{kd} + i'_f) \\ \phi_{mq} = \omega_b L_{md}(i_q - i_{kq}) \end{cases} \quad (2.37)$$

Ainsi la force électromotrice  $E_f$  d'excitation dans le circuit rotorique de l'alternateur synchrone à pôles saillants est donnée par :

$$E_f = \frac{x'_{md}}{r'_f} V_f'' \quad (2.38)$$

Où :

$x'_{md}$  est l'inductance transitoire directe ramenée au stator,

$V_f''$  est la tension d'excitation rotorique,

$r'_f$  est la résistance du circuit d'excitation ramenée au stator.

#### 2.6.1 Les courants en fonction des flux magnétiques :

$$\begin{cases} i_d = \frac{\phi_d - \phi_{md}}{x_{ls}} \\ i_q = \frac{\phi_q - \phi_{mq}}{x_{ls}} \\ i'_{kd} = \frac{\phi'_{kd} - \phi_{mq}}{x'_{lkd}} \\ i'_f = \frac{\phi'_f - \phi_{md}}{x'_{lf}} \end{cases} \quad (2.39)$$

Les équations de flux mutuels ( $\phi_{md}, \phi_{mq}$ ) définissent les flux mutuels en fonction des courants et des inductances :

$$\begin{cases} \phi_{md} = x_{md} \left( \frac{\phi_d}{x_{ls}} + \frac{\phi'_{kd}}{x_{lkd}} + \frac{\phi'_f}{x_{lf}} \right) \\ \phi_{mq} = x_{mq} \left( \frac{\phi_q}{x_{ls}} + \frac{\phi'_{kq}}{x_{lkq}} \right) \end{cases} \quad (2.40)$$

### 2.6.2 Équation du couple électromagnétique :

$$C_{em} = \frac{p}{\omega_b} (\phi_d i_q - \phi_q i_d) \quad (2.41)$$

Le moment d'inertie  $H$  caractérise l'inertie du rotor. Il intervient dans l'équation du mouvement. Sa valeur dépend de la puissance de base et de la vitesse synchrone :

$$H = \frac{1}{2} j \left( \frac{\omega_{bm}^2}{S_b} \right)$$

Où :

- $\omega_{bm} = \frac{\omega_b}{2}$ ,  $\omega_{bm}$  est la vitesse angulaire mécanique de base,
- $\omega_m$  est la vitesse angulaire mécanique,
- $H$  est le moment d'inertie,
- $S_b$  représente la puissance apparente de base.

## 2.7 Modélisation de turbine à gaz

on se base sur le modèle de rowen qui offre la possibilité de simuler une vaste gamme de turbines "Heavy-Duty" à arbre unique en circuit ouvert, avec une plage de puissance allant de quelques dizaines à plusieurs centaines de MW. Il est spécialement conçu pour étudier le fonctionnement dynamique des réseaux électriques, et est utilisé par EDF pour simuler le comportement dynamique des turbines à gaz.

Ce modèle intègre un contrôle de la vitesse, de la température et de l'accélération, prenant également en considération les limites supérieures et inférieures du débit de combustible.[14]

**L'équation du couple s'exprime comme suivant :**[15]

$$f_2 = 1.3(W_F - 0.23) + 0.5(1 - N) \quad (2.42)$$

$\dot{W}_F$  est le débit du gaz entrant dans la chambre de combustion en unité p.u. (par unité)

$N$  la vitesse de la turbine en unité p.u. (par unité).

### Conception de turboalternateur en ilotage

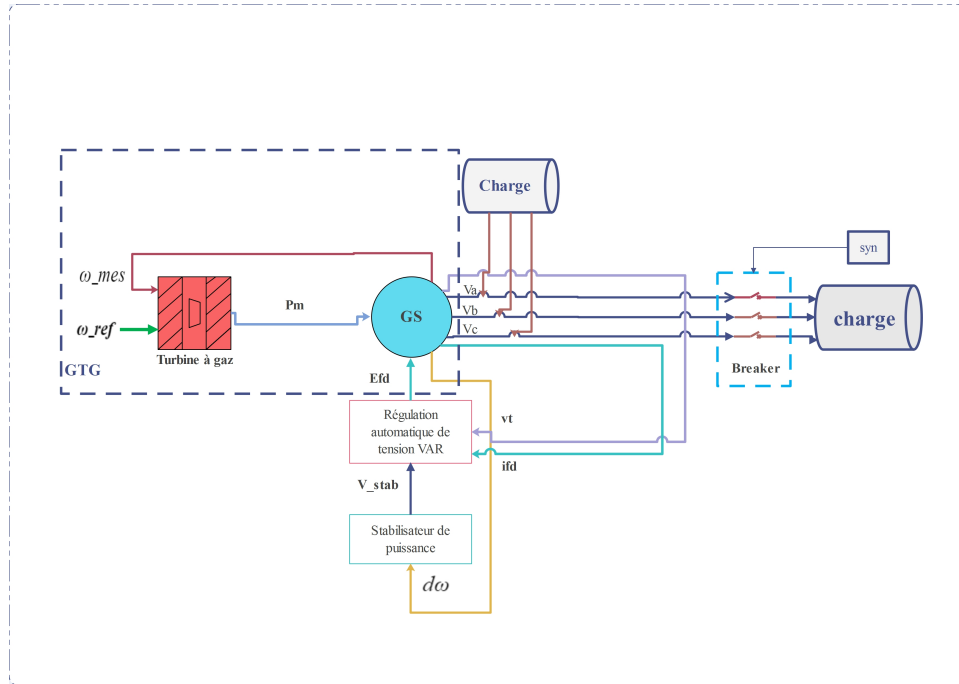


Figure 2.2: Schéma global turboalternateur en ilotage

## 2.8 RÉSULTATS DE LA SIMULATION

Les paramètres de la machine synchrone présentée dans le **tableau 2.2** branchée à des charges en suivant le protocole listé sur le tableau des enclenchements des disjoncteurs pour pouvoir étudier La réponse et La stabilité du système turboalternateur.

Les paramètres de l'alternateur sont les suivants : regardons le tableau ci-dessous

Paramètre de l'alternateur	Valeur
La puissance apparente nominale en (MVA)	39.375 MVA
La tension nominale en (KV)	11kv
La fréquence en (HZ)	50 HZ
La réactance $X_d$ en (pu)	1.954 pu
La réactance $X_q$ en (pu)	0.96 pu
La réactance transitoire $X'_d$ en (pu)	0.252 pu
La réactance sub-transitoire $X''_d$ en (pu)	0.177 pu
La réactance sub-transitoire $X''_q$ en (pu)	0.238 pu
La Réactance de fuite $X_l$ en (pu)	0.123 pu
Coefficient de frottement (s)	00 s
La Résistance statorique $R_s$ en (pu)	0.015 pu
Le nombre de paires de pôles	02

Table 2.2: Tableau des paramètres

Application d'un protocole de charge comme on l'indique sur le tableau suivant :

Charge	Instant de déclenchement	Puissances actives (MW)	Puissances réactives (VAR)
01	OUVERTURE à 20	4.5 MW	0
02	FERMETURE à 5	4.5 MW	0
03	FERMETURE à 10	5 MW	100 VAR
04	FERMETURE à 15	10 MW	200 VAR

Table 2.3: Protocoles de charge en fonction du temps

- **Temps de simulation** : La durée totale de la simulation est de 25 secondes, ce qui permet d'observer le comportement dynamique de la machine synchrone sous différentes conditions.
- **Algorithme choisi pour la méthode numérique** : La méthode 'ode23s' de Rosenbrock .
- **Tolérance relative** : La tolérance relative a été fixée à  $10^{-3}$
- **Fréquence de rotation** : La machine synchrone fonctionne à une fréquence de rotation de 1500 (rev/min), correspondant à une fréquence de 50 Hz pour la machine à 4 pôles.

Ces conditions ont été choisies pour garantir une simulation réaliste et représentative des opérations typiques d'une machine synchrone, permettant une analyse détaillée des performances et de la stabilité du système.

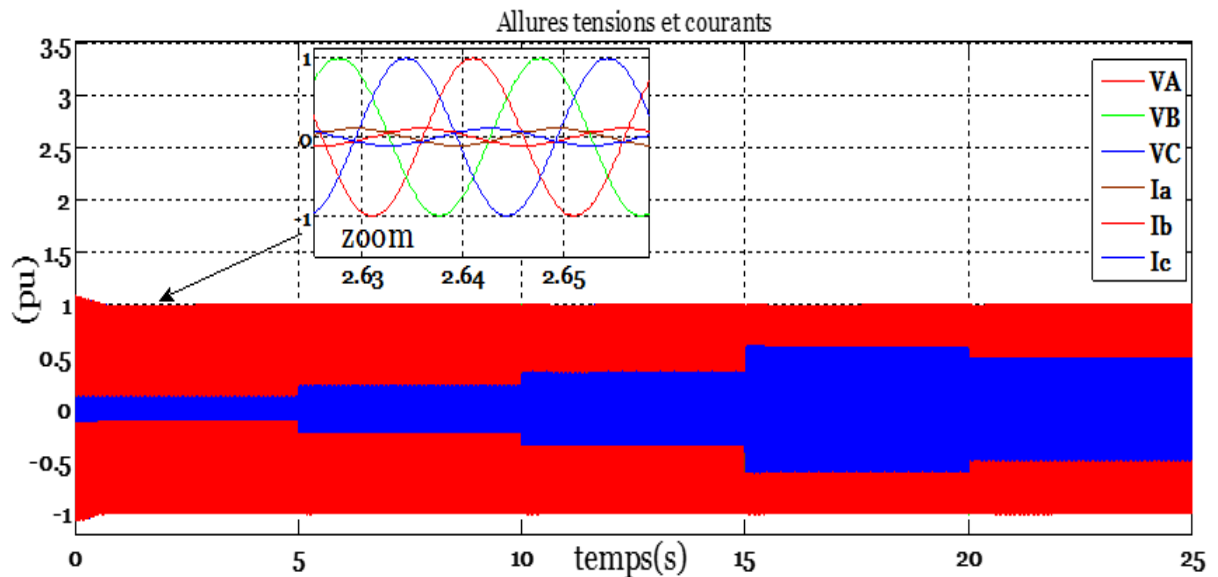


Figure 2.3: Allures, tensions& courants

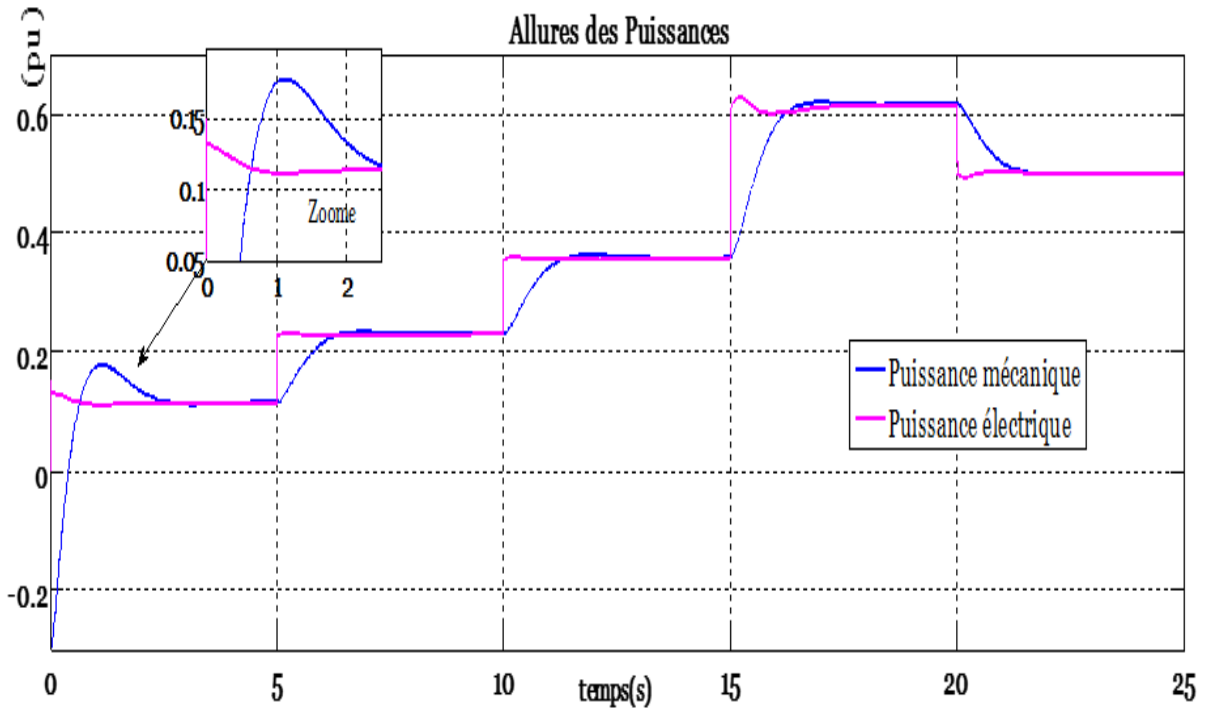


Figure 2.4: Allures des Puissances

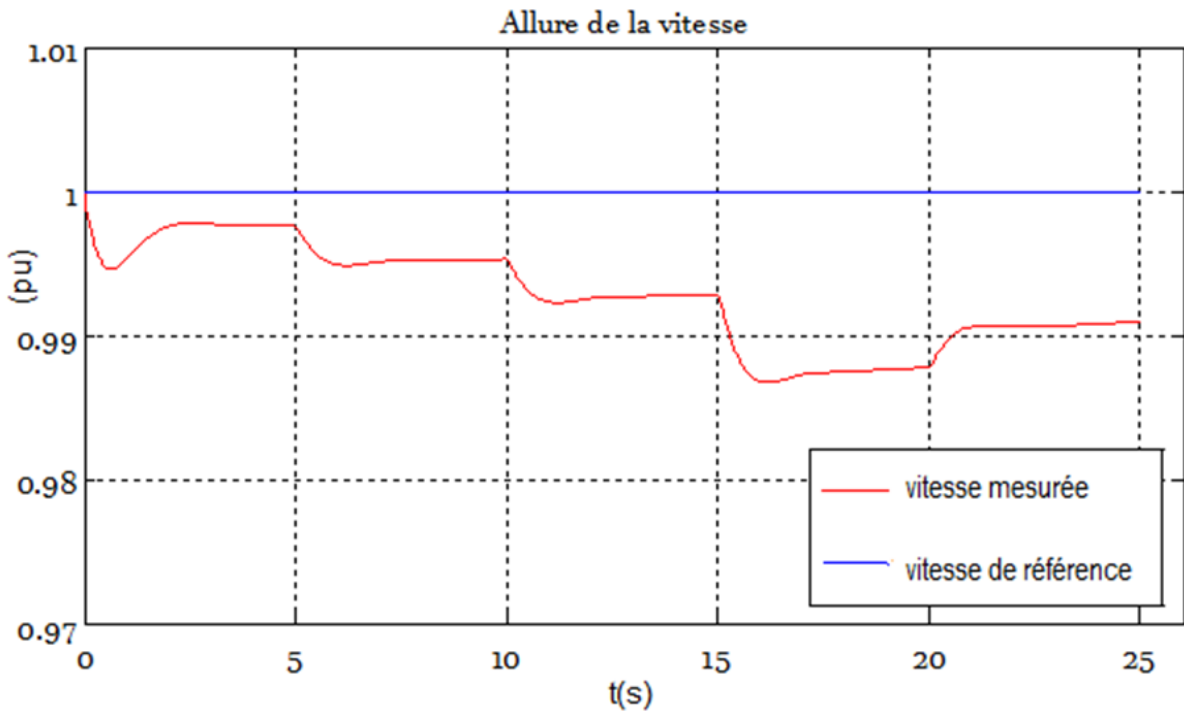


Figure 2.5: Allure de la vitesse mesurée par rapport à la vitesse de référence



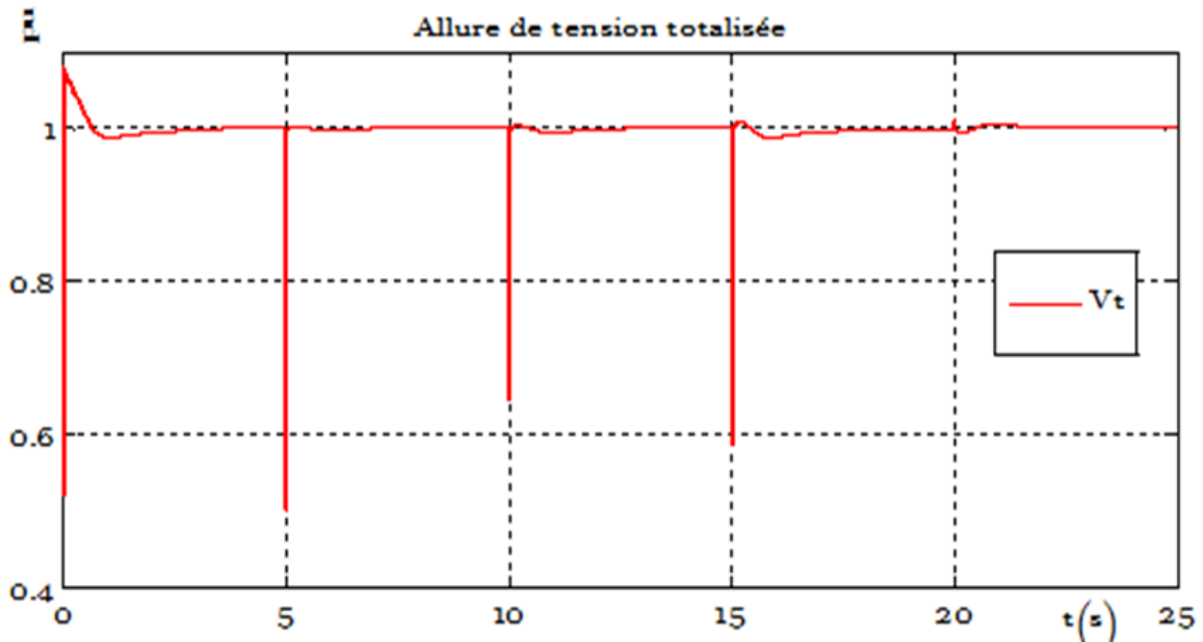


Figure 2.6: Allure de la tension instantanée

## 2.9 Interprétation des résultats

**Figure(2.4)** On observe que la puissance mécanique commence à une valeur de -2,2 (pu), tandis que la puissance électrique commence à 0 pu. On remarque aussi que la puissance mécanique dépasse la puissance électrique au démarrage, atteignant une valeur de 0,19 pu à l'instant 1,15 seconde. Ensuite, les deux puissances se stabilisent à une valeur de 0,11 pu. La figure montre que les deux puissances augmentent et diminuent à chaque fois que le disjoncteur de charge s'ouvre et se ferme. Il faut aussi noter que la réponse de la puissance électrique est beaucoup plus rapide que celle de la puissance mécanique.

Ce qui concerne **la figure (2.5)** La vitesse de référence est stabilisée à 1 (pu). La vitesse mesurée de l'alternateur commence aussi à 1 pu, mais chute à 0,994 pu à l'instant 0,6 seconde. Après cet instant, elle revient à l'état de stabilisation à 0,997 pu. Chaque fois que le disjoncteur de charge se déclenche, on observe une chute de vitesse avec un temps de réponse lent. Cela s'explique par l'inertie mécanique de l'alternateur qui ne peut pas réagir instantanément aux variations de charge.

**Figure(2.6)** La tension totalisée  $V_t$  qui la somme des deux tensions directe et quadratique, leur allure débute par front-montant de tension qui commence de 0.5 pu jusqu'à 1.08 pu après elle chute vers la valeur 1 pu sur laquelle elle stabilise. La ressemblance avec l'allure de la vitesse, c'est à l'instant du déclenchement des disjoncteurs de charge, il y aura une chute suivie d'une stabilisation.

**Figure(2.3)** Le zoom montre nous que Les courants  $I_{abc}$  et les tensions  $V_{abc}$  sont sinusoïdaux, on voit que les courants augmente a chaque fois que le disjoncteur de charge est appliqué par contre les tensions reste inchangeables malgré les charges appliques, on remarque aussi qu'elles débutent par une variation entre [-1.08pu 1.08pu] après stabilisons sur l'intervalle de [-1pu 1pu] chaque fois la charge est placée il y a une petite chute des tensions

## 2.10 Conclusion

Cette simulation approfondie du turboalternateur en îlotage a permis de mieux comprendre les phénomènes transitoires et les interactions entre les différentes grandeurs électriques et mécaniques. Ces résultats sont essentiels pour la conception, l'optimisation et la commande de systèmes de turboalternateurs en îlotage, afin de garantir leur stabilité et leur fiabilité dans des conditions de fonctionnement réelles.

## Chapitre 3

# Régulation du système et Implantation de l'intelligence artificiel

### 3.1 Introduction

La stabilité et la qualité de l'électricité produite par les turboalternateurs à gaz dépendent de nombreux facteurs, notamment le Power System Stabilizer (**PSS**) et le contrôle de la tension réactive (**VAR**). Le PSS est un système de régulation qui agit sur l'excitatrice du générateur pour amortir les oscillations de puissance et maintenir la stabilité du réseau électrique. Le contrôle VAR, quant à lui, permet de réguler la tension et le facteur de puissance, assurant ainsi la qualité de l'électricité fournie aux consommateurs. Cependant, la coordination de ces différents systèmes de régulation représente un défi de taille pour les exploitants de centrales électriques.

Sur ce chapitre aussi, on a utilisé l'intelligence artificielle (**IA**), plus exactement la logique floue, pour le contrôle de la vitesse du turboalternateur. La logique floue est une méthode de raisonnement qui permet de traiter des données imprécises ou incertaines en attribuant des degrés de certitude aux informations. Appliquée à l'IA, cette approche rend possible la création de systèmes de contrôle plus flexibles et adaptés aux situations complexes. Comparé au contrôleur **PID** utilisé dans le chapitre précédent

### 3.2 L'automatique voltage régulation (VAR)

Dans notre étude, on va utiliser un modèles régulateur automatique de tesion :

**Le modèle AC1A** Ce modèle selon le standard IEEE 412.5 représente un système d'excitation sans balais, avec redresseurs non contrôlés. Le modèle est linéaire à l'exception de la fonction de saturation de l'excitateur « SE[VE] », et de la fonction de fonctionnement du redresseur « FEX ».



$$V_R = V_{ref} - V_C - V_F + V_s \left( \frac{1 + sT_C}{1 + sT_B} \right) \left( \frac{K_A}{1 + sT_A} \right) \quad (3.7)$$

De plus, la boucle de rétroaction donne les expressions suivantes :

$$V_F = \left( \frac{sK_F}{1 + sT_F} \right) V_{FE} \quad (3.8)$$

En remplaçant l'expression pour  $V_R$  et  $V_F$  dans l'équation pour  $E_{fd}$ :

$$E_{fd} = \frac{(V_{ref} - V_C - \left( \frac{sK_F}{1+sK_F} \right) V_{FE} + V_s) \left( \frac{1+sT_C}{1+sT_B} \right) \left( \frac{K_A}{1+sT_A} \right) - K_D I_{FD} - K_E V_E + S_E(V_E) V_E}{sT_E} F_{EX} \quad (3.9)$$

La dernière équation montre la relation entre les entrées  $V_{ref}$ ,  $V_C$ ,  $V_s$  du système d'excitation AC1A, des paramètres tels que le gain et la constante de temps et la tension du champ de sortie  $E_{fd}$ . La tension de champ maximale ou la tension du plafond peut être calculée en utilisant les limites supérieures des limiteurs de non-enroulement et d'enroulement.[16]

$T_C$  et  $T_B$  sont les constantes de temps du système du premier ordre représentant un compensateur d'avance et de décalage.

$K_D$  : La constante dé-magnétisante.

$E_{fd}$  : Tension de champ.

pour le réglage du AC1A sur MATLAB:

**Gain de l'excitatrice et constante de temps:** La valeur per défaut est [1.0 0.80]

**Valeurs de tension de l'alternateur d'excitation:** La valeur par défaut est (4.18 3.14]

**Valeurs de la fonction de saturation de l'excitatrice:** La valeur par défaut est (0.10 0.03]

**Facteur de démagnétisation  $K_d$ :** La valeur par défiant est 0.38.

**Facteur de charge du redresseur  $K_e$ :** La valeur par défunt est 0.20.

### 3.3 stabilisateur de puissance (PSS)

Le stabilisateur de puissance (PSS) est un dispositif qui améliore les performances dynamiques des systèmes électriques en utilisant des signaux de stabilisation supplémentaires pour agir sur le système d'excitation. Il exploite généralement des grandeurs telles que la vitesse de rotation de l'arbre, la fréquence et la puissance en entrée. Son utilisation est souvent nécessaire pour amortir les oscillations de puissance, assurant ainsi une stabilité accrue, notamment en cas de faibles signaux.[17]

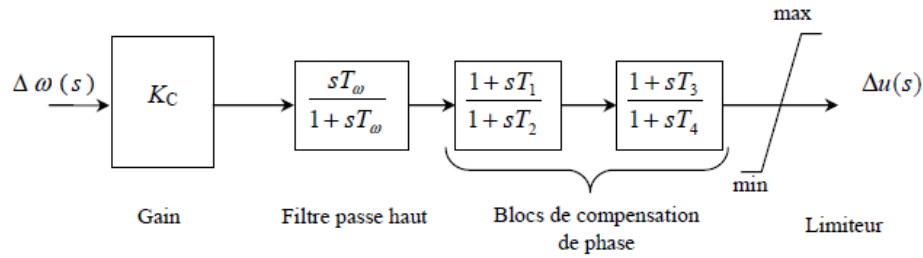


Figure 3.2: stabilisateur de puissance

### 3.4 régulateur PID

Les paramètres du régulateur PID utilisés dans la simulation sont présentés de manière détaillée dans le tableau ci-dessous. Ces paramètres sont essentiels pour définir le comportement du régulateur PID et influent directement sur sa capacité à contrôler le système avec précision et stabilité. Ils comprennent généralement les trois termes du régulateur PID : proportionnel (P), intégral (I) et dérivé (D), ainsi que les valeurs spécifiques attribuées à chaque terme.

Dans la pratique, le paramètre proportionnel (P) détermine la réponse du régulateur en fonction de l'erreur actuelle, le paramètre intégral (I) corrige les erreurs cumulées sur une période de temps et le paramètre dérivé (D) anticipe les variations de l'erreur dans le temps. Ces paramètres sont ajustés de manière itérative lors de la phase de réglage du régulateur PID afin d'obtenir les performances souhaitées du système, telles qu'une réponse rapide sans oscillations excessives ni dépassement suivants:

Paramètre	Valeur
KP	26.46
KI	20.23
KD	8.623

### 3.5 logique floue

La conception d'un régulateur flou de type Mamdani fondée sur la logique floue, une méthode qui utilise des valeurs ou des degrés de vérité exprimés par des nombres réels compris entre 0 et 1. Cette approche fonctionne selon le principe suivant : si X est A, alors Y est B. La logique floue est particulièrement efficace pour gérer des situations complexes où les frontières entre différentes conditions ne sont pas clairement définies, permettant ainsi de modéliser et de contrôler des systèmes avec des comportements imprécis ou incertains.

#### Étapes de l'inférence Mamdani

L'inférence Mamdani se décompose en quatre étapes clés pour traiter les informations floues :

**La fuzzification** est le processus de conversion d'une grandeur physique en une variable floue ou linguistique. Cette étape consiste à déterminer le degré d'appartenance de la mesure de la variable physique à un ensemble flou spécifique dans l'univers de discours. l'entrée utilisé sur mon projet est la vitesse de rotation et sa variation.

**Évaluation des règles :** Cette étape implique l'évaluation des règles définies pour chaque situation. Les règles sont généralement définies sous forme de tableaux de décision, où chaque règle est associée à une condition spécifique et à une conséquence correspondante. (tableau en bas)

**Agrégation des sorties des règles :** Cette étape consiste à combiner les résultats des règles évaluées. Les résultats sont souvent combinés en utilisant des opérateurs logiques tels que l'AND (minimum) ou l'OR (maximum)

**Défuzzification :** Cette dernière étape consiste à convertir la valeur floue en une valeur nette et précise. La défuzzification peut être réalisée par diverses méthodes, telles que le premier ou dernier maximum, la moyenne des maxima, ou un calcul des barycentres pondérés. Le choix de la méthode dépend du type de variable de sortie et de la logique souhaitée [18]

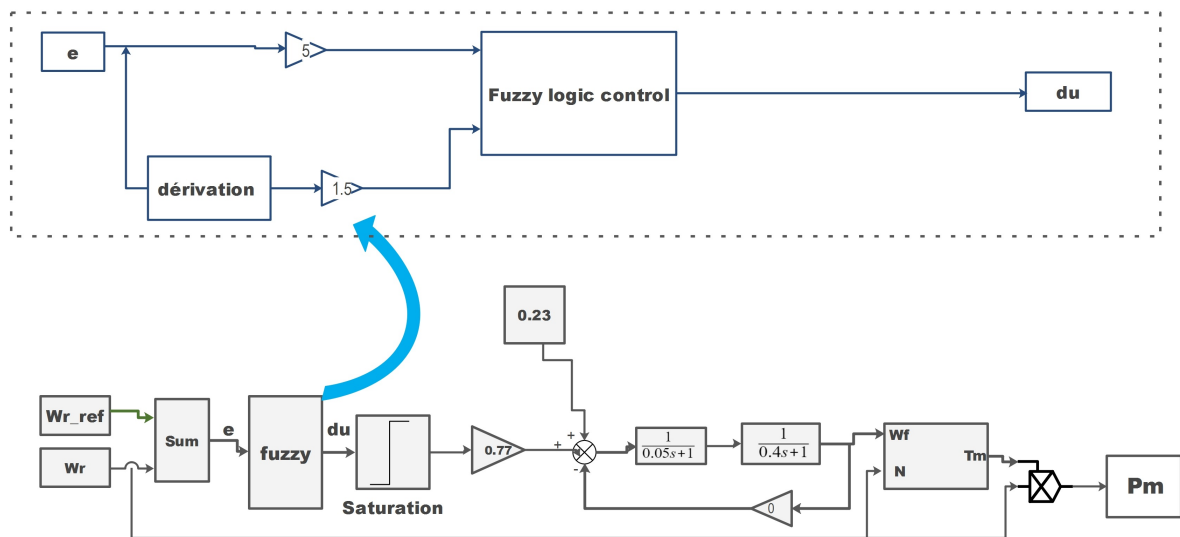


Figure 3.3: Boucle de contrôle logic floue

### Tableau des règles

Le tableau décrit la règle de réglage flou pour le contrôleur FLC.

$e \backslash de$	N	Z	P
N	N	N	Z
Z	N	Z	P
P	Z	P	P

Table 3.1: Tableau des règles FLC

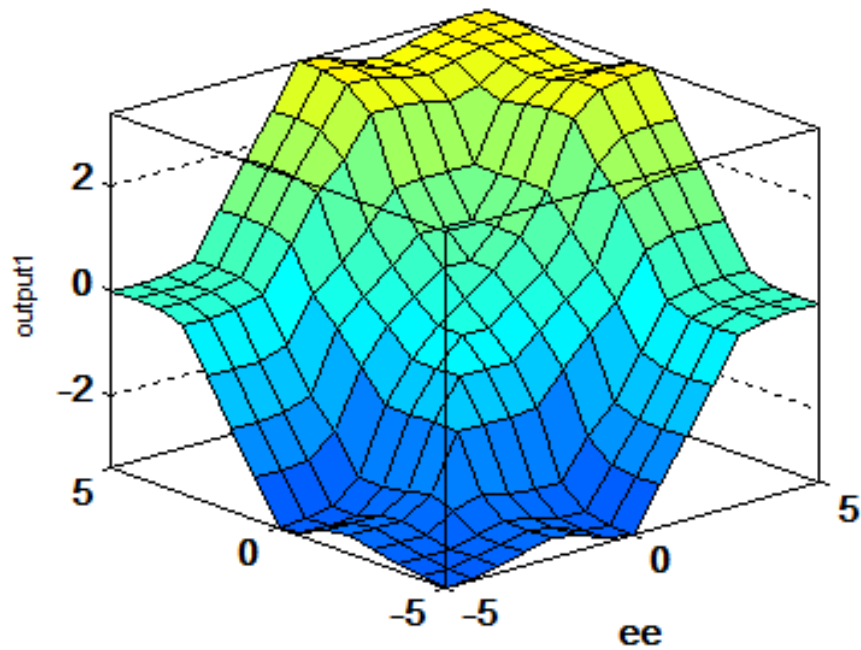


Figure 3.4: La surface du Fuzzy

### 3.6 simulation à base de régulateur foule

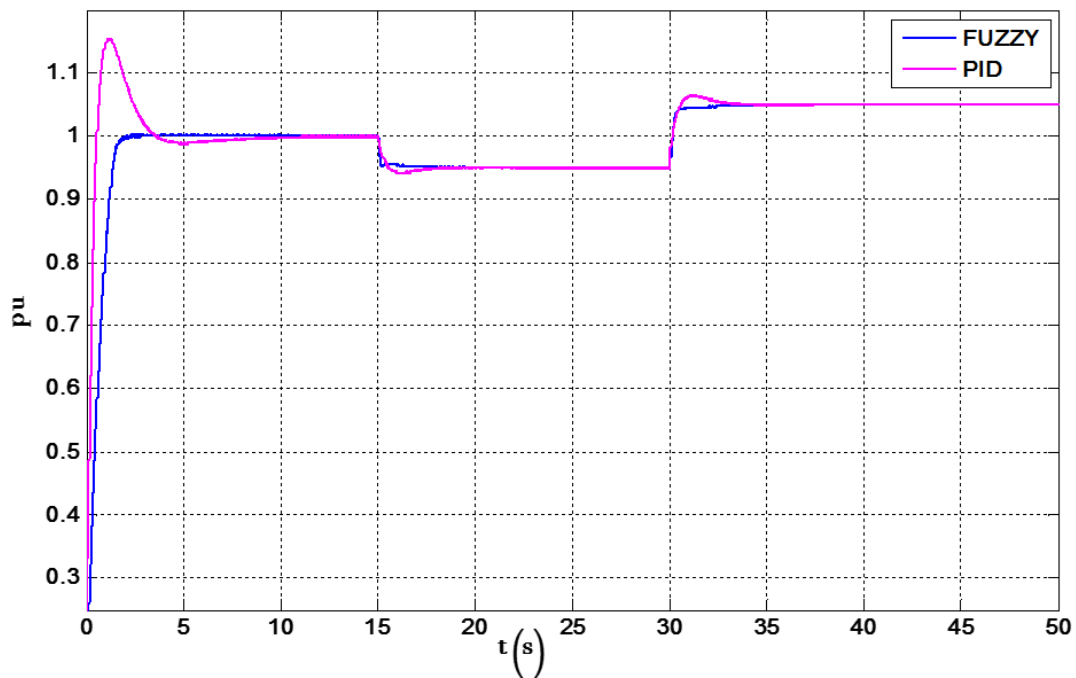


Figure 3.5: allure de vitesse turbine

Cette caractéristique en vitesse est obtenue en faisant varier momentanément la consigne de la vitesse entre (1pu, 0.95 p.u.et 1.05 pu) aux intervalles respectifs ([0s 15s], [15s 30s], [30s 50s]) pour un couple résistant nul.



## interprétation

On observe que le régulateur flou ne présente aucun dépassement, bien qu'il ait un temps de réponse relativement lent environs. En revanche, le régulateur PID affiche un temps de réponse long aussi accompagnés d'un dépassement considérable 0.112 pu. Selon la figure (3.5), les deux régulateurs atteignent une erreur nulle à l'état d'équilibre. Cependant, la dynamique de réponse en termes de vitesse du système semble nettement supérieure avec le régulateur pid.

### 3.7 Turbo-alternateur connecté au réseau

Nous ajoutons à la simulation précédente un réseau électrique qui sera connecté à un jeu de barres où un alternateur synchrone est déjà présent. Par conséquent, le turbo-alternateur sera synchronisé au réseau. Pour réaliser cette synchronisation, certaines conditions doivent être respectées :

**1. Fréquence de l'alternateur :** La fréquence de l'alternateur doit correspondre exactement à celle du réseau pour assurer une synchronisation correcte. Une différence de fréquence peut entraîner des oscillations et des dysfonctionnements dans le réseau électrique. Cette condition est cruciale pour maintenir la stabilité du système et pour prévenir les perturbations harmoniques.

**2. Tension de l'alternateur :** La tension de sortie de l'alternateur doit être ajustée pour correspondre à la tension du réseau. Une égalité des tensions est essentielle pour éviter les flux de courant indésirables qui pourraient surcharger les composants du système et entraîner des pertes d'énergie. L'égalisation des tensions assure également une répartition uniforme de la charge entre l'alternateur et le réseau.

**3. Déphasage entre les phases :** Le déphasage entre les phases du réseau et de l'alternateur doit être nul. Cela signifie que les ondes sinusoïdales de tension et de courant des deux sources doivent être parfaitement alignées. Un déphasage entraînerait une circulation de puissances réactives indésirables, ce qui pourrait provoquer des échauffements et une réduction de l'efficacité du système. Une synchronisation sans déphasage assure une transition en douceur et une opération stable du réseau.

### 3.8 synchronisation

Pour adapter la vitesse de la turbine et la fréquence du générateur à un réseau électrique, il est nécessaire d'utiliser une boucle à verrouillage de phase (PLL) pour identifier les paramètres d'amplitude des tensions. Les valeurs des fréquences et les séquences de phases du générateur synchrone et du réseau électrique sont ensuite combinées dans le contrôleur de flux d'état pour réaliser le processus de synchronisation. [19]

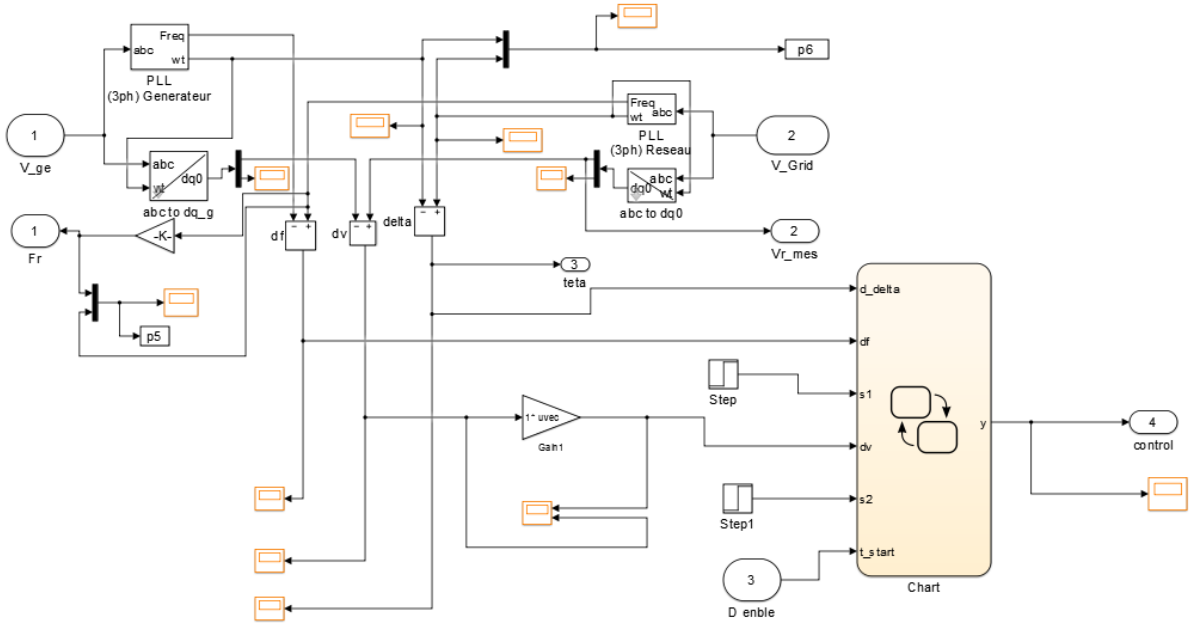


Figure 3.6: schéma bloc synchronisation

un organigramme du système de synchronisation qui est programmée en fonction des différentes d'écart erreurs absolus reçues par le contrôleur de flux d'état **figure(3.6)**.

les erreurs du système GTG et de la grille sont successivement les écarts erreurs absolues des fréquences ( $\Delta f$ ), l'amplitude de l'écart erreur des tensions ( $\Delta V$ ) et des séquences d'écart de phases erreur ( $\Delta \delta$ ). Les signaux ( $s_1, s_2$ ) sont la logique sélectionnée fonctions du disjoncteur qui sont alternativement ouvertes ou closes, et ( $t_{start} = 0$  ou  $1$ ) est la permissivité pour lancer le démarrage de la synchronisation. Le signal de sortie ( $y = s_1$  ou  $s_2$ ) est dédié au contrôle de l'ouverture ou de la fermeture du circuit disjoncteur (générateur CB). L'organigramme du flux d'état du contrôleur est divisé en deux branches parallèles. Comme décrit dans la figure (3.7), la branche primaire est constituée de plusieurs conditions. Si ces conditions sont vérifiées, l'affectation du contrôleur de la sortie ( $y$ ) prend ( $y = s_1$ ), sinon l'affectation prend ( $y = s_2$ ).



### 3.9 RÉSULTATS DE LA SIMULATION

Pour simuler le fonctionnement de notre raffinerie, nous allons adopter le mode isochrone. Ce mode de fonctionnement est utilisé pour réguler la fréquence de l'alternateur de manière constante, indépendamment des variations de charge. En mode isochrone, l'alternateur maintient une fréquence stable malgré les fluctuations de la demande en électricité.

application d'un protocole de charge comme on l'indique sur le tableau suivant

Charge	Instant de déclenchement	Puissances actives (MW)	Puissances réactives (VAR)
01	OUVERTURE à 20	2.5 MW	0 VAR
02	FERMETURE à 5	2.5 MW	0 VAR
03	FERMETURE à 10	5 MW	0 VAR

Table 3.2: Protocoles de charge en fonction du temps

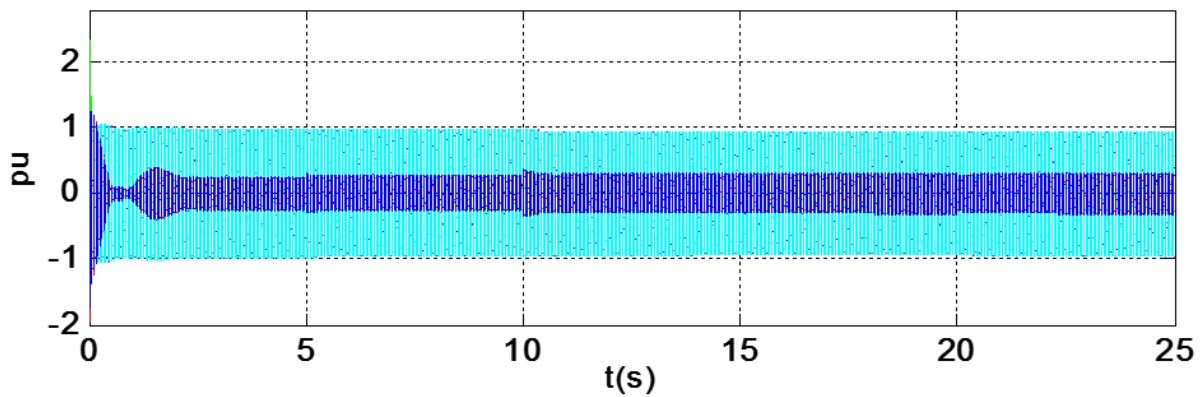


Figure 3.9: allure des courants et tensions

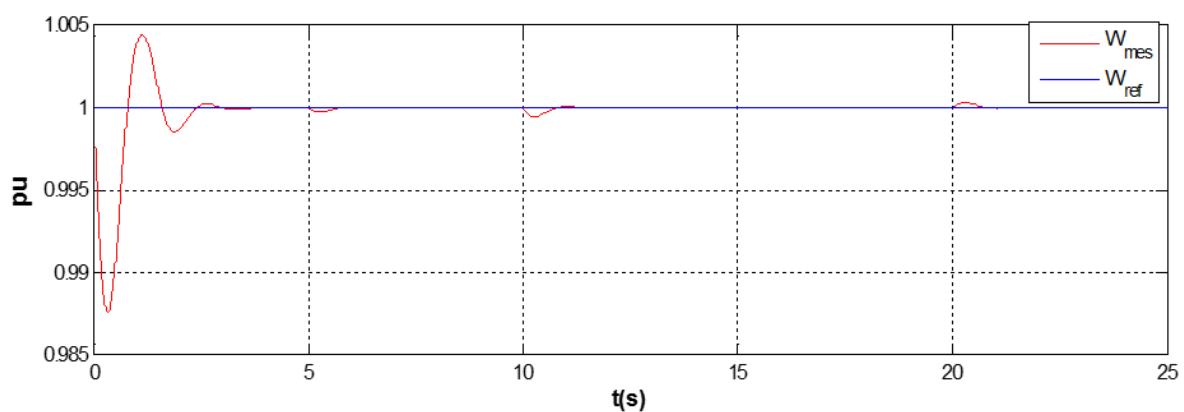


Figure 3.10: Allures des vitesses

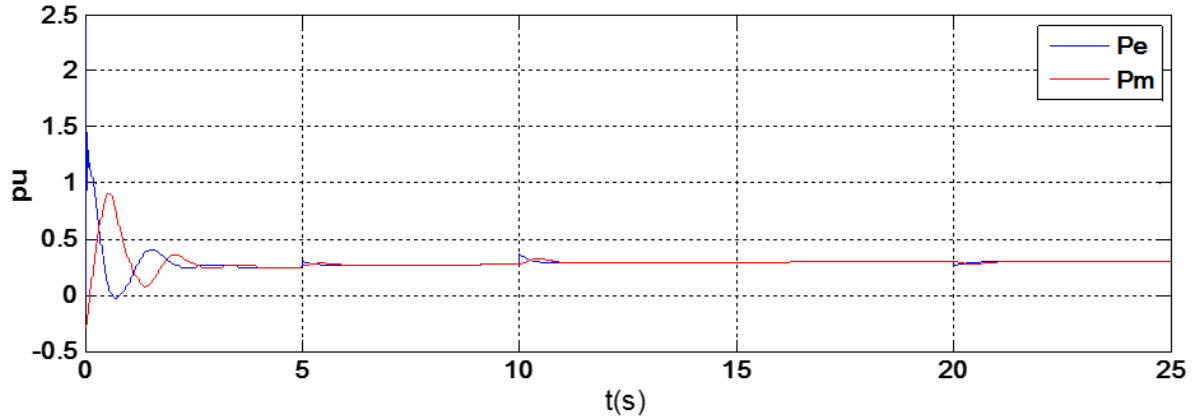


Figure 3.11: allure des puissances

Lorsque la machine est synchronisée au réseau, le régime transitoire de 3 secondes indique une réponse plus lente par rapport à l'îlotage. Cela peut être attribué à l'inertie du système et à la nécessité de synchroniser avec la fréquence du réseau, ce qui introduit des ondulations pendant la stabilisation. Ces ondulations peuvent être liées aux ajustements de fréquence et de tension nécessaires pour maintenir la synchronisation avec le réseau.

La **figure 3.9** montre que la tension prend plus de temps à se stabiliser lorsqu'elle est connectée à un réseau, comparativement à une situation en îlotage. Cependant, grâce au régulateur automatique de tension (AVR), le régime transitoire au démarrage reste correct, avec des ondulations qui s'atténuent après environ 3 secondes. Lorsque la charge augmente, une baisse de la tension et un pic de courant se produisent, mais le système parvient rapidement à respecter la consigne de tension.

De même, la **figure 3.10** montre que la vitesse subit des ondulations au début pendant 3 secondes, puis se stabilise. À chaque fois que le disjoncteur de charge se ferme, on observe également une ondulation.

La **figure 3.11** montre des pics de puissance mécanique et des ondulations de l'allure de la puissance électrique à chaque fois que la charge s'applique.

### 3.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons détaillé la conception complète d'un ensemble turbo-alternateur, intégrant divers systèmes électriques essentiels tels que l'Automatic Voltage Regulator (AVR), le Power System Stabilizer (PSS) et les différents régulateurs. Notre étude s'est concentrée sur une comparaison approfondie entre deux types de régulateurs, à savoir le régulateur FUZZY et le régulateur PID, en les évaluant par rapport au modèle de la turbine seule.

Après avoir mené les simulations du modèle développé précédemment, nous avons obtenu des résultats extrêmement satisfaisants. En mode îlotage, la réactivité de la GTG aux variations de charge a été remarquable, avec une stabilité exemplaire lors de l'ajout ou du retrait de charges. Lorsque le turbo-alternateur est connecté au réseau électrique, notre étude a confirmé la stabilité globale du système, validant ainsi sa fiabilité opérationnelle.

En mode isochrone, la machine synchrone a maintenu la vitesse assignée de 1 pu de manière constante tout au long de la simulation. Nous avons observé des perturbations minimales lors des opérations de fermeture ou d'ouverture des disjoncteurs, ce qui souligne l'excellente performance et la robustesse du système dans des conditions variées.

En résumé, nos investigations ont mis en lumière non seulement la robustesse des configurations étudiées, mais aussi la capacité du système à répondre efficacement aux exigences de charge et à maintenir des niveaux de stabilité élevés, quel que soit le mode de fonctionnement envisagé.

## Conclusion générale

Mon travail a été réalisé à la raffinerie d'Alger de la SONATRACH, située à SIDI ARCINE, où j'ai effectué mon stage. Celui-ci s'est révélé bénéfique car il m'a permis de découvrir le milieu industriel. Mon projet consistait à étudier et simuler, à l'aide du logiciel MATLAB/Simulink, le système Turbo-alternateur à gaz connecté au réseau électrique existant. Ce générateur constitue la principale source d'électricité de la raffinerie, appuyée par le réseau électrique national.

Dans un premier temps, j'ai décrit brièvement la raffinerie, ses composants électriques, ainsi que les dispositifs de protection mis en place pour assurer la sécurité du personnel et du matériel. J'ai également détaillé les éléments constitutifs de la GTG, notamment la turbine et la machine synchrone avec son groupe d'excitation.

Ensuite, j'ai présenté la modélisation de la machine synchrone fonctionnant en tant que générateur et de la turbine selon le modèle de ROWEN.

Grâce à cette modélisation préliminaire, j'ai pu concevoir dans le chapitre 3 un modèle de simulation détaillé de la turbine selon le modèle simplifié de ROWEN et de la machine synchrone, intégré dans l'environnement MATLAB/Simulink. Chaque composant du modèle a été minutieusement expliqué.

Une étude comparative des trois régulateurs (PID, FUZZY et FUZZY-PID) a été réalisée, démontrant que le régulateur FUZZY-PID, combinant les avantages des deux autres, présente la meilleure dynamique de réponse.

J'ai ensuite procédé à la simulation des modèles développés précédemment, notamment la GTG en îlotage et la GTG connectée au réseau en mode isochrone. Les résultats obtenus ont été analysés quant à diverses caractéristiques telles que la vitesse de rotation du générateur, la puissance mécanique et électrique, ainsi que les tensions et courants de sortie du générateur et du réseau. Ces résultats ont confirmé la satisfaction des performances du système. En particulier, le régulateur de vitesse et la puissance mécanique générée par la turbine, ainsi que le système d'excitation AVR, ont été jugés efficaces dans le maintien de la stabilité du système, même face à des perturbations ou lors du partage de la puissance entre le générateur et le réseau électrique .

cette étude pourraient servir de base pour le développement de systèmes de protection pour les turbo-alternateurs, tels que les relais numériques, en incluant la protection des lignes d'arbres, la prévention des pertes d'excitation et le maintien de la synchronisation du système.

# Bibliography

- [1] *Document technique de la raffinerie d'alger.*
- [2] BOUANAKA, Fouzia. *Étude numérique du refroidissement interne d'une aube de turbine à gaz.* Mémoire de Master en Génie Mécanique. Centre Universitaire Abdelhafid Boussouf - Mila, 2021/2022.
- [3] BOUMEDIENE, Nour Elhouda and NOURINE, Amina. *Calcul du rendement de turbine à gaz par la méthode de Chambadal à différentes températures.* Mémoire de Master Académique, Filière : Génie des procédés, Option: Génie Chimique. Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem, 2019/2020.
- [4] LAKHAL, Ameer. *Etude et modélisation de la machine synchrone.* Mémoire de Master. Université Badji Mokhtar – Annaba, Département Electrotechnique, Faculté Sciences de l'Ingéniorat, Filière Electrotechnique.
- [5] DJAMEL, Aouzellag. *Chapitre 02, cours master deux, construction des machines spéciales.* Département Génie Électrique, Université de Béjaïa, 2024.
- [6] SALHI, Zaki. *Étude des performances d'une machine synchrone à réluctance variable.* Mémoire de Master en Génie électrique. Université Kasdi Merbah Ouargla, 2021/2022.
- [7] BAROUDI, Fethi and BOULABBAS, Zineb. *Modélisation et commande de vitesse d'un alternateur basé sur des régulateurs innovants.* Mémoire de Master en génie électrique. Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem, 2020/2021.
- [8] BENSEBAA, Said. *Calcul, identification des paramètres et modélisation d'un alternateur.* Mémoire de Master. Ecole Nationale Polytechnique, Département d'Electrotechnique, 2016.
- [9] MATI, Kheireddine et BOUDAHRI, Ahmed. *Modélisation et identification hors ligne des paramètres d'une machine synchrone à rotor bobiné de faible puissance.* Mémoire de Master. Université Aboubakr Belkaïd - Tlemcen, Département Génie Électrique, 2019/2020.
- [10] HADDAD, Abderazak and AMERANE, Meriama. *Étude de la stabilité d'une machine synchrone reliée à un réseau de puissance infinie.* Mémoire de Master. Département d'Electrotechnique, 2014
- [11] BADRAOUI, Mourad et BEREKSI REGUIG, Meriem. *Étude et modélisation du moteur synchrone simple et double étoile avec application de la commande backstepping à la machine synchrone.* Mémoire de Master. Faculté de Technologie, Département de Génie Electrique et Electronique, Université Abou Bekr Belkaïd – Tlemcen, 2015/2016.



- [12] HAMZA, Messaoud. *Régulation en Tension et Vitesse d'un Alternateur*. Mémoire de Master. Département d'Electrotechnique, Ecole Nationale Polytechnique, 2016.
- [13] EREMIA, Mircea and SHAHIDEHPOUR, Mohammad. *Handbook of Electrical Power System Dynamics: Modeling, Stability, and Control*. John Wiley Sons, 2013.
- [14] CLAEYS, Gérald. *Modélisation de la production indépendante dans les réseaux de distribution*. Thèse de doctorat. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2001.
- [15] ROWEN, William I. *Simplified mathematical representations of heavy-duty gas turbines*. *Journal of Engineering for Power*, 105(1), 865–869, 1983. American Society of Mechanical Engineers.
- [16] JANKEE, Pitambar. *Synchronous generator and excitation system response to GIC*. University of Cape Town, Department of Electrical Engineering, 2020.
- [17] RAOUF, DJAMEL and KHELEF, MOUHAMED ACHRAF. *Amélioration de la stabilité de système mono-et multi-machine par méthode intelligente*. Mémoire de Master. Université d'Hamma Lakhdar d'El-Oued, 2022-2023.
- [18] DOUDOU, Sofiane. *Contribution à la commande moderne des systèmes non linéaires multivariables non affines*. Thèse de Doctorat. Université Sétif 1, 2013.
- [19] Lyes ABBASSEN et Nacereddine BENAMROUCHE et Amar BOUSBAIN *Etude du Comportement d'un Turboalternateur Connecté au Réseau Electrique*, , SYMPOSIUM DE GENIE ELECTRIQUE (SGE 2020), 30 JUIN 2 JUILLET 2020, NANTES, FRANCE, 2020, organization NANTES, FRANCE

# Liste d'abréviations

Abréviation	Signification en anglais	Signification en français
ECS	Electrical control system	Système de contrôle électrique
DCS	Distributed control system	Système de contrôle distribué
GTG	Gas turbine generator	Générateur de turbine à gaz
LCS	Local control system	Système de contrôle local
STG	Steam turbine generator	Générateur de turbine à vapeur
UCP	Unit control panel	Panneau de commande de l'unité
PCC	Point of common coupling	Point de couplage commun
CPP	Captive power plant	Centrale électrique captive
GIS	Gas insulated switchgear	Appareillage à gaz isolé
OLTC	On load tap changer	Chargeur de prises en charge
PSS	Power system stabilizer	Stabilisateur de tension
AVR	Automatic voltage regulation	Régulation de tension automatique
N	negative	négative
P	positive	Positive
Z	zero	zero